

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



A utilização de *Unmanned Aerial Systems* (UAS) para a aplicação de Fotogrametria Digital e produção de Cartografia para homologação.

Tomás Bettencourt de Carvalho Machado

Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica – Tecnologias e Aplicações

Trabalho de Projeto orientado por:
Professora Doutora Paula Maria Ferreira de Sousa Cruz Redweik
Doutor Sérgio Alexandre Monteiro Prazeres

Dedicatória e agradecimentos

A toda a equipa *The Use Concept, Lda.* por me ter recebido no seu espaço e por todo o conhecimento partilhado e ao Engenheiro Geógrafo Paulo Lusitano pela coordenação dos pontos GPS para o controlo de qualidade da cartografia.

À minha orientadora Paula Redweik por ter aceitado orientar este trabalho, por toda a paciência, motivação e conhecimentos. Pela sua orientação, que não se resume a mandar fazer, mas sim procurar como fazer.

Ao meu orientador Sérgio Prazeres pela tranquilidade, motivação e por querer fazer de mim um bom geógrafo. Por todas as portas que me abre e pela oportunidade e confiança de me incluir no seu círculo de trabalho.

Aos meus orientadores, espero ter estado à altura das suas exigências e que este trabalho traga orgulho e simbolize todo o trabalho realizado nestes 2 anos.

Um agradecimento muito especial aos meus pais por todo o amor, pela educação e maneira de ver o mundo como o vejo, por todo o apoio em todas as fases da minha vida e por me darem sempre a liberdade de traçar o meu próprio caminho. Espero nunca vos desiludir e que eu seja capaz de retribuir tudo o que me deram, e continuam a dar, a triplicar. Amo-vos.

Ao meu avô Hélio, à “avó velhinha”, ao avô “Bé” e à minha avó Aida por me terem acompanhado no vosso tempo de vida, espero que estejam orgulhosos.

À minha namorada Marta Curado que deu um novo significado à minha vida. É o ser mais puro e bondoso que existe e sem ela não sei se teria arranjado forças para chegar ao final deste caminho. Obrigado por toda a motivação, por me teres obrigado a seguir em frente e procurar soluções e formas de combater as minhas inquietações, por todo o amor que me dás e por toda a felicidade que me trazes. Estarei sempre aqui para ti. Je t’aime a lot mutcho für immer e repete 1402201826022018 vezes.

Aos meus gatos Morais, Mya e Kima e à minha cadela Sasha pelo amor incondicional e a todos os que já não estão presentes, que serão eternamente lembrados, e à nova membra da família Gaia, que receberá o mesmo amor.

À Marta, Sara, Sérgio, Carlos, Cristiano, Cajó, Bernardo e Miguel pela licenciatura e amizade.

Ao Filipe e ao Sérgio pela amizade, conversas, festas e jogatanas até às tantas da manhã. São como irmãos para mim.

Aos Edgares, Brian, Pedro, Ricardo e Alexandre pela amizade e carinho. Ao Edgar Tavares pelas conversas sobre anime e ao Brian por todas as chamadas de vídeo depois de teres partido para o Canadá.

E, por fim, à vida, que apesar de matreira, me deu tudo o que tive, tenho e terei de bom.

Resumo

A utilização de *Unmanned Aerial Systems* (UAS) tem ganho popularidade, quer para lazer quer para fins profissionais. Esta tendência tem levado a que cada vez mais empresas utilizem estes sistemas para a produção dos seus próprios produtos cartográficos por serem uma solução de baixo custo, comparado com levantamentos aerofotográficos clássicos por avião, por permitirem voar a altitudes mais baixas, pela sua elevada resolução espacial e pela sua facilidade e flexibilidade de uso.

O objetivo principal deste trabalho de projeto é avaliar se a utilização de UAS, como fonte primária de fotografias aéreas, para a produção de Cartografia seguindo as “Normas e Especificações Técnicas para a Cartografia Topográfica Vectorial e de Imagem” de abril de 2020, impostas pela Direção Geral do Território (DGT), é viável para uma empresa de pequena dimensão.

Para este trabalho foi adotada a plataforma *Phantom 4 Pro VI* da DJI e utilizada a aplicação da DroneDeploy para o plano de voo, planeou-se o apoio topográfico para a missão e, por fim, foram analisados os produtos gerados automaticamente e a cartografia obtida por estereorrestituição de uma área com cerca de 13 ha a partir de uma altitude de voo de 120 m *Above Ground Level* (AGL).

Depois de obtidas as fotografias foi utilizado o *software Pix4D Mapper* para o processamento inicial das fotografias, a georreferenciação, e para os restantes processos para gerar os produtos automáticos: Nuvem de pontos, Modelo Digital de Superfície (MDS), ortofotomosaico, Modelos Digitais de Terreno (MDT) com resoluções espaciais de 0.5 m e 2 m e as respetivas curvas de nível.

A produção de cartografia de traço foi feita em ambiente *Photomod 5 Lite* da Racurs. O método de restituição utilizado para a produção da cartografia foi a estereorrestituição via anaglifos. Esses dados foram exportados em formato *Shapefile* (.shp) e editados em ambiente *ArcMap*. Criou-se uma *Geodatabase* para armazenar os dados nos seus respetivos temas. Também foi validada a topologia dos objetos de modo a remover os erros topológicos e foram criadas as relações necessárias referidas nas normas da DGT.

Para o controlo de qualidade posicional foram utilizados pontos de cota de um levantamento topográfico já existente e levantados 48 pontos com GPS. Depois de calculado o Erro Médio Quadrático (EMQ) de todos os produtos passíveis de controlo de qualidade geométrica, compararam-se os resultados com os valores de referência das normas da DGT.

Todos os produtos passaram no critério da exatidão posicional exigida. O MDT de 0.5 m de resolução obteve um EMQ de ± 0.126 m e o MDT de 2 m, um EMQ de ± 0.168 m; o ortofotomosaico registou um EMQ de ± 0.095 m; por fim a estereorrestituição obteve uma exatidão altimétrica de ± 0.084 m e uma exatidão planimétrica de ± 0.115 m.

Embora não estando nas normas, também foi feito um controlo de qualidade às curvas de nível e pontos cotados, ambos restituídos interativamente. De forma a estimar o desvio entre a altimetria restituída e o terreno aplicou-se a lei da propagação dos erros aleatórios. Assim, para as curvas de nível, registou-se um EMQ de aproximadamente ± 0.303 m. Por sua vez, para os pontos cotados registou-se um EMQ de ± 0.213 m.

Palavras-chave: UAS, Cartografia, Controlo de qualidade, Estereorrestituição, Nuvem de pontos.

Abstract

The use of Unmanned Aerial Systems (UAS) has gained popularity for both leisure and professional purposes. This tendency has led more companies to use these systems to produce their own cartographic products for being a low-cost solution, compared to classical aerophotographic surveys by planes, capable of flying at lower altitudes, high spatial resolution and for its ease and flexibility of use.

The main goal of this project is to assess whether the use of UAS, as primary source of aerial imagery, for the production of cartographic products conforming the standards imposed by Direção Geral do Território (DGT) – “Normas e Especificações Técnicas para a Cartografia Topográfica Vetorial e de Imagem”, since April 2020 – is viable for a small company.

For this project the DJI Phantom 4 Pro V1 platform was employed and for the flight plan it was used DroneDeploy App, a topographic survey was planned, and finally the automatic-generated products and the stereo-vectorized cartography were analysed. The study area has approximately 13 ac and the imagery was obtained from 120 m Above Ground Level (AGL).

After the aerophotographic survey, the Pix4D Mapper software was used for the initial processing, georeferencing and for the remaining processes to generate the automatic products: Point Cloud, Digital Surface Model (DSM), Orthophotomosaic, Digital Terrain Models (DTM) with 0.5 m and 2 m of spatial resolution and the corresponding contour lines.

The map production was done in Racurs Photomod 5 Lite environment. The vectorization method applied to produce cartography was stereo-plotting via anaglyphs. The cartographic products were exported in shapefile (.shp) and edited in ArcMap environment. A Geodatabase was created to store the data in their respective themes. Topology rules were also validated for the objects in order to remove topological errors and relationship classes were created referred in DGT standards.

To assess the positional quality, elevation points from an existing topographic survey and 48 points were surveyed with GPS. After calculating the Mean Square Error (MSE) of all liable products to geometric quality control, the results were compared with reference values of the DGT standards.

All products have passed the required positional accuracy criterion. The 0.5 m resolution DTM had an MSE of ± 0.126 m and the 2 m DTM an MSE of ± 0.168 m; the orthophotomosaic registered an MSE of ± 0.095 m; finally, the stereo-vectorized cartography obtained an altimetric accuracy of ± 0.084 m and a planimetric accuracy of ± 0.115 m.

Although not within the standards, a positional quality control was also carried out on the contour lines and height points, both obtained interactively. To estimate the deviation between the altimetry objects and the terrain the law of propagation of uncertainty. Thus the contour lines registered an MSE of ± 0.303 m. On the other hand, for the height points the MSE registered ± 0.213 m.

Key-words: UAS, Cartography, Quality Control, Stereo-Vectorization, Point Cloud.

Índice

Resumo	ii
Abstract	iii
Lista de figuras	vii
Lista de quadros.....	x
Lista de abreviaturas.....	xi
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura do trabalho de projeto.....	2
2. Estado da arte	3
2.1 Fotogrametria.....	3
2.2 Definição de UAS.....	4
2.3 Desenvolvimento dos UAS.....	4
2.3.1 UAS de asa fixa e rotores.....	5
3. Fundamentos teóricos.....	7
3.1 Projeto fotogramétrico	7
3.2 Orientações fotogramétricas.....	8
3.2.1 Orientação Interna.....	8
3.2.2 Orientação Externa.....	8
3.3 Aerotriangulação.....	10
3.4 Modelos Digitais de Elevação.....	10
3.5 Ortorretificação de fotografias aéreas	12
3.6 Estereorrestituição.....	14
4. Unmanned Aerial Systems	14
4.1 Categorias de operação de UAS.....	14
4.1.1 Categoria aberta	14
4.1.2 Categoria específica	14
4.1.3 Categoria certificada	15
4.2 Tipos de UAS.....	15
4.2.1 Quadricoptero.....	15
4.2.2 Asa fixa	16
4.2.3 Quadricoptero vs asa fixa.....	17

4.3	Legislação	17
4.3.1	Convenção de Chicago.....	18
4.3.2	Regulamentação europeia em vigor	18
4.3.3	Operação de UAS em território nacional	19
5.	Sistemas de posicionamento.....	20
5.1	Pontos fotogramétricos	20
5.1.1	Características dos PF	21
5.1.2	Registo dos PF	23
6.	Enquadramento geográfico da área de estudo	23
7.	<i>Software</i> para o plano de voo	24
8.	Metodologia.....	26
8.1	Faseamento do trabalho	26
8.2	Voo e apoio topográfico: Execução	27
8.2.1	Plano de voo.....	28
8.2.2	Marcação e coordenação dos PF	29
8.2.3	Equipamento	29
8.3	<i>Workflow</i> do Pix4D.....	30
8.4	<i>Workflow</i> do Photomod 5 Lite	36
8.5	<i>Workflow</i> do ArcGIS.....	42
8.6	Controlo de qualidade	46
9.	Resultados e discussão	50
9.1	Relatório Pix4D.....	50
9.2	Nuvem de pontos e 3D Mesh	55
9.3	Modelo Digital de Superfície	57
9.4	Modelo Digital de Terreno e curvas de nível.....	60
9.4.1	Controlo de qualidade dos MDT e curvas de nível.....	62
9.5	Ortofotomapa	63
9.5.1	Controlo de qualidade do ortofotomapa.....	66
9.6	Estereorrestituição.....	66
9.6.1	Área de trabalho	66
9.6.2	Toponímia	68
9.6.3	Altimetria	69
9.6.4	Transportes.....	72
9.6.5	Construções.....	73

9.6.6	Ocupação do solo	74
9.6.7	Infraestruturas e Serviços de Interesse Público.....	75
9.6.8	Mobiliário Urbano e Sinalização	76
9.6.9	Controlo de qualidade da informação restituída	77
10.	Considerações finais.....	78
11.	Referências bibliográficas	81
Anexos.....		85
Anexo I: Evolução dos UAS		85
	Balão	85
	Papagaios	86
	Helicóptero	86
Anexo II: Faseamento do trabalho		89
Anexo III: Restituição sobreposta ao ortomosaíco.....		90
Anexo IV: Mapa de Boavista		92
Anexo V: Fichas de PF.....		94

Lista de figuras

Figura 2.1 - Voo de balão de Nadar.	3
Figura 3.1 – Fases de um projeto fotogramétrico.....	7
Figura 3.2 – Ângulos de atitude do avião ω , ϕ , κ	9
Figura 3.3 – Condição de colinearidade.	9
Figura 3.4 – Diferença entre MDT e MDS.....	11
Figura 3.5 – Projeções fotográficas. a) Projeção Central; b) Projeção ortogonal.....	13
Figura 3.6 – Ortorectificação digital: Direta (lilás) e Indireta (vermelho).....	13
Figura 4.1 – DJI Phantom 4 Pro	16
Figura 4.2 – SenseFly eBee X	16
Figura 5.1 – Janela temporal. a) 10/08/2018; b) 04/09/2019.....	22
Figura 5.2 – Dimensões para PF.	22
Figura 5.3 – Gráfico de d em função da escala da foto.	23
Figura 5.4 – Exemplos de PF. a) Pintado; b) Tela de plástico.	23
Figura 6.1 – Localização do aeródromo de Santa Cruz – LPSC.	24
Figura 7.1 – Interface da aplicação <i>DroneDeploy</i>	25
Figura 8.1 – Plano de voo utilizado para a missão.	28
Figura 8.2 – Localização dos PF	29
Figura 8.3 – Workflow do processo no <i>Pix4D Mapper</i> e os parâmetros utilizados.	30
Figura 8.4 – Identificação de um PF numa fotografia.	31
Figura 8.5 – Parâmetros para a nuvem de pontos.....	31
Figura 8.6 – Configuração dos parâmetros para a <i>3D Mesh</i>	33
Figura 8.7 – Demonstração de confusões entre classes (1). Os pontos a vermelho representam aqueles que foram classificados como <i>Ground</i> e pertencem à classe <i>High Vegetation</i>	33
Figura 8.8 – Demonstração de confusões entre classes (2). Os pontos a vermelho representam aqueles que foram classificados como <i>Building</i> e/ou <i>Road Surface</i> e pertencem à classe <i>Human Made Object</i>	34
Figura 8.9 – Eliminação do ruído através da reclassificação. a) Ruído existente em locais com sombra; b) Ruído existente em telhados refletores.	34
Figura 8.10 – Eliminação do ruído através da criação de superfícies. a) Ruído existente num depósito de água; b) Solução para a falta de pontos 3D.	35
Figura 8.11 – Workflow do processo no <i>Photomod 5 Lite</i> e os seus parâmetros.....	37
Figura 8.12 – Disposição inicial das fotografias.	37
Figura 8.13 – Parâmetros específicos da câmara da DJI.	38
Figura 8.14 – Parametros de orientação interna presentes no relatório de qualidade do <i>Pix4D</i> , sendo a segunda coluna relativa à distância focal da lente, a terceira o ponto principal em X e a quarta coluna o ponto principal em Y.	38
Figura 8.15 – Organização do ficheiro criado pelo <i>Pix4D</i>	39
Figura 8.16 – Ambiente de trabalho após a georreferenciação direta das fotografias.....	39
Figura 8.17 – Aspeto da base de dados cartográfica.	39
Figura 8.18 – Organização da base de dados. a) Apresentação dos temas, sub-temas e classes de objetos; b) Apresentação dos atributos pertencentes à classe do objeto das Construções.	40
Figura 8.19 – Janela de criação da classe do objeto.	40
Figura 8.20 – Janela de criação dos atributos para a classe do objeto.....	41
Figura 8.21 – Aspeto do ambiente de trabalho para a estereorrestituição.	41
Figura 8.22 – Posicionamento das marcas flutuantes.....	41
Figura 8.23 – <i>Workflow em ArcGIS</i>	42

Figura 8.24 – Aspetto final da tabela de atributos do objeto Edificio.....	43
Figura 8.25 – Domínio <i>TrueFalse</i>	43
Figura 8.26 – Atribuição do domínio <i>TrueFalse</i> a um atributo.....	44
Figura 8.27 – Aplicação do domínio <i>TrueFalse</i> . a) Atributo “suporte” do objeto <i>ConstruLinear</i> antes da aplicação do domínio; b) O mesmo atributo após a aplicação do domínio.....	44
Figura 8.28 – Criação das relações entre tabelas em <i>ArcMap</i>	45
Figura 8.29 – Exemplo de demonstração das relações entre <i>ViaRodov</i> , <i>SegViaRodov</i> e <i>ViaRodovLimite</i>	46
Figura 8.30 – Aspetto da ferramenta <i>Identify</i>	47
Figura 8.31 – Pontos coordenados por GPS para o controlo de qualidade. a) Pontos utilizados para o controlo de qualidade dos MDT; b) Pontos (a vermelho) nos limites da rodovia; c) Pontos (a amarelo) nas caixas de visita e esquinas de muros.....	48
Figura 8.32 – Extração das coordenadas dos pontos para o controlo de qualidade em ambiente <i>AutoCAD 2021</i>	49
Figura 8.33 – Pontos utilizados para o controlo de qualidade da ortofoto.....	50
Figura 9.1 – Deslocamento entre a posição inicial das fotografias (pontos azuis) e a posição calculada (pontos verdes); Deslocamento entre a posição inicial dos pontos de controlo (cruzes azuis) e a posição calculada (cruzes verdes); em baixo, vista frontal dos deslocamentos em XZ; ao lado direito, vista lateral dos deslocamentos em YZ; os pontos vermelhos representam as fotografias desativadas; as elipses verde-escuras representam a incerteza da posição absoluta das fotografias (500x ampliada) resultante do ajustamento do bloco.....	51
Figura 9.2 – Qualidade da cobertura aerofotográfica. a) Mapa do número de sobreposições de fotografias calculadas por cada pixel do ortofotomapa; b) Correspondências entre os pontos conspícuos 2D (gradiente entre as cores cinza e preto). As elipses verde-escuras representam a incerteza da posição relativa da câmara (500x ampliada) do resultante do ajustamento do bloco.....	52
Figura 9.3 – Nuvem de pontos densificada.....	55
Figura 9.4 – <i>3D Mesh</i>	56
Figura 9.5 – Exemplo da edição de nuvem de pontos com geração de planos artificiais (1).....	56
Figura 9.6 – Exemplo da edição da nuvem de pontos com geração de planos artificiais (2).....	57
Figura 9.7 – MDS com resolução de 5 cm. a) MDS resultante da nuvem de pontos sem edição; b) MDS resultante da nuvem de pontos após a edição.....	58
Figura 9.8 – Exemplo de correção de um reservatório de água. a) MDS antes da edição; b) Reservatório de água na nuvem de pontos.....	58
Figura 9.9 – Exemplo de correção dos telhados da estufa. a) Nuvem de pontos antes da aplicação das superfícies; b) aspeto do MDS antes da aplicação das superfícies; c) Aplicação das superfícies na nuvem de pontos; d) Aspetto do MDS após a aplicação das superfícies.....	59
Figura 9.10 – Diferenças registadas entre os dois MDS.....	60
Figura 9.11 – Diferenças registadas entre MDT. a) Diferenças entre os MDT de 50 cm; b) Diferenças entre os MDT de 2 m.....	60
Figura 9.12 – Curvas de nível geradas para a partir dos MDT. a) Curvas de nível geradas a partir do MDT de 50 cm; b) Curvas de nível geradas a partir do MDT de 2m.....	61
Figura 9.13 – MDT após edição das nuvens de pontos densificadas. a) MDT 50 cm; b) MDT 2 m....	62
Figura 9.14 – Sobreposição das curvas de nível interpoladas a partir dos dois MDT.....	63
Figura 9.15 – Resultado final do ortofotomapa com 5 centímetros de resolução espacial.....	64
Figura 9.16 – Exemplo de edição da nuvem de pontos densificada e resultado na ortofoto (1).....	64
Figura 9.17 – Exemplo de edição da nuvem de pontos densificada e resultado na ortofoto (2).....	65
Figura 9.18 – Exemplo de edição da nuvem de pontos densificada e resultado na ortofoto (3).....	65

Figura 9.19 – Exemplos de deformações ocorridas no ortofotomapa. a) Deformações no limite do projeto; b) Deformações ocorridas em vegetação; c) Deformações junto ao limite do telhado.....	66
Figura 9.20 – Representação da Área de trabalho, Tema Auxiliar.....	67
Figura 9.21 – Temas e classes de objetos identificáveis na área de trabalho.	68
Figura 9.22 – Tema Toponímia.	68
Figura 9.23 – Tema altimetria.	69
Figura 9.24 – Diferença de cotas entre as curvas restituídas e o MDT com resolução espacial de 50cm.	70
Figura 9.25 – Diferença de cotas entre os pontos cotados restituídas e o MDT com resolução espacial de 50cm.	71
Figura 9.26 – Tema Transportes.....	72
Figura 9.27 – Tabela ViaRodov.	73
Figura 9.28 – Tema Construções.....	73
Figura 9.29 – Tema Ocupação do solo.....	75
Figura 9.30 – Tema Infraestruturas e serviços de interesse público.....	76
Figura 9.31 – Tema Mobiliário e sinalização.....	77

Lista de quadros

Tabela 3.1 – Pârametros das equações de colinearidade.	10
Tabela 4.1 – Quadricopteros vs Asa fixa. As bolas a verde são atribuídas às características em que determinado tipo de UAS é superior a outro; as bolas vermelhas correspondem ao oposto.	17
Tabela 7.1 – Pontos fortes e pontos fracos do <i>DroneDeploy</i>	25
Tabela 8.1 – Equipamento utilizado.	30
Tabela 8.2 – Resoluções dos produtos geográficos de acordo com o NdD1.	35
Tabela 8.3 – Parâmetros para as curvas de nível.	36
Tabela 8.4 – Regras estabelecidas para a topologia.	44
Tabela 8.5 – Lista de variáveis necessárias para a aplicação do EMQ.	47
Tabela 9.1 – Tabela de incertezas da posição absoluta e orientação da câmara.	51
Tabela 9.2 – Tabela de pontos conspícuos 2D	53
Tabela 9.3 – Tabela de precisão dos Pontos de Controlo (PF).	53
Tabela 9.4 – Tabela de precisão dos Pontos de Verificação	54

Lista de abreviaturas

- 2D - Bidimensional
- 3D – Tridimensional
- AAN – Autoridade Aérea Nacional
- AGL – *Above Ground Level*
- ANAC – Autoridade Nacional da Aviação Cível
- ARP – Aeronave Remotamente Pilotada
- AT – Aerotriangulação
- ATZ – *Aerodrome Traffic Zone*
- BLOS – *Beyond Line Of Sight*
- CMOS - *Complementary Metal Oxide Semiconductor*
- CTR – *Control Zone*
- DEM – *Digital Elevation Model*
- DHM – *Digital Height Model*
- DSM – *Digital Surface Model*
- DTM – *Digital Terrain Model*
- EG – Erro de Gráficoismo
- EMQ – Erro Médio Quadrático
- FAP – Força Aérea Portuguesa
- FOV – *Field Of View*
- GBD – *File Geodatabase*
- GCP – *Ground Control Point*
- GPS – *Global Positioning System*
- GPU – *Graphics Processing Unit*
- GNSS – *Global Navigation Satellite System*
- GRID – Grelha Regular Quadrática ou Retangular
- GSD – *Ground Sampling Distance*
- ICAO – *International Civil Aviation Organization*
- ICNF – Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas
- IDW – *Inverse Distance Weighting*
- IMU – *Inertial Measuring Unit*
- InSAR – *Interferometric Synthetic-Aperture Radar*
- INS – *Inertial Navigation System*
- LiDAR – *Light Detection and Ranging*

MB – *Megabyte*
MDE – Modelo Digital de Elevação
MDS – Modelo Digital de Superfície
MDT – Modelo Digital de Terreno
MNT – Modelo Numérico Topográfico
MP – *Megapixel*
MSL – *Mean Sea Level*
MTOM – *Maximum Take-Off Mass*
NAV – Navegação Aérea de Portugal
NdD – Nível de Detalhe
NdD1 – Nível de Detalhe 1
NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*
NIR – *Near Infrared*
NRTK – *Network Real Time Kinematic*
OE – Orientação Externa
OI – Orientação Interna
PF – Ponto Fotogramétrico
RAM – *Random-Access Memory*
RGB – *Red Green Blue*
ROA – *Remotely Operated Aircraft*
RPAS – *Remotely Piloted Aircraft Systems*
RPV – *Remotely Piloted Vehicle*
RTK – *Real-Time Kinematic*
SfM – *Structure from Motion*
SIG – Sistemas de Informação Geográfica
TIN – *Triangulated Irregular Network*
TRMZ – *Transponder Radio Mandatory Zone*
UA – *Unmanned Aircraft*
UAS – *Unmanned Aerial Systems*
UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*
UE – União Europeia
VANT – Veículos Aéreos Não-Tripulados
VLOS – *Visual Line Of Sight*
WITAS - *Wallenberg Laboratory for Information and Autonomous Systems*

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Nos dias de hoje a localização assume um papel muito importante para a sociedade. A resposta a questões como: “Onde se pode construir? Qual o caminho mais rápido entre o ponto A e o ponto B? Onde devem ser construídas as infraestruturas de um país? Qual o hospital mais próximo da minha localização?”, e a muitas mais questões, implica que exista informação geográfica disponível com grande exatidão e de qualidade bem como o mais atualizada possível. Assim, a cartografia topográfica assume-se como uma fonte primordial para obtenção de informação geográfica (Serra, 2014), pela sua diversidade de temas – toponímia, altimetria, hidrografia, transportes, construções, ocupação do solo, etc. – pela estrutura da base de dados e pela qualidade posicional exigida pela DGT, desde que a informação seja para homologação, tornando-se oficial.

A cartografia topográfica deve representar todos os temas existentes no território num determinado momento no tempo. No entanto, a ocupação do solo não é estática no tempo, está em constante mudança, provocando a desatualização dessa mesma cartografia (Serra, 2014). Para o cidadão e para as empresas a primeira fonte de cartografia topográfica será sempre a DGT ou os municípios detentores dessa cartografia muitas vezes esta encontra-se desatualizada, sendo necessário realizar levantamentos topográficos clássicos ou comprar um novo levantamento aéreo e a sua cartografia topográfica correspondente (Serra, 2014), o que pode tornar um projeto muito dispendioso.

Uma possível solução para combater a desatualização da cartografia topográfica, para poupar custos e permitir uma melhor resolução espacial e temporal será a utilização de *Unmanned Aerial Systems* (UAS) – por outras palavras, Sistemas Aéreos Não-tripulados. Nos últimos anos estes sistemas têm sido cada vez mais aperfeiçoados e utilizados quer para fins de lazer, como para fins académicos e profissionais, na área da multimédia e geoespacial. Estes equipamentos podem ter estruturas compatíveis com rotores, asa fixa, ou ambos, são capazes de manter a estabilidade perante ventos moderados, oferecem autonomias de operação cada vez maiores e podem ser equipados com uma grande panóplia de sensores como: câmaras fotográficas, sensores térmicos e de infravermelhos, câmaras multiespectrais, sensores *Light Detection and Ranging* (LiDAR), ou até múltiplos sensores, sendo o limite a sua capacidade de carga. Para além dos sensores anteriormente referidos, estas plataformas ainda estão equipadas com sistemas de localização GNSS/IMU (*Global Navigation Satellite System/Inertial Measuring Unit*), altímetros, bússolas e até já existe a possibilidade de integrar o sistema RTK (*Real-Time Kinematic*) de forma a aumentar a precisão da localização por GPS para ± 1 cm.

A utilização destes sistemas permite realizar levantamentos fotográficos a baixa altitude em pequenas ou médias áreas, com baixo custo de operação, menos tempo de espera para trabalhar e utilizar os dados e ainda com a vantagem de poder repetir o levantamento sem grandes custos. A possibilidade de um sistema *consumer-grade*¹ permitir que uma pessoa comum, empresa, Junta de Freguesia, Câmara Municipal, entre outras entidades, consigam fazer os seus próprios levantamentos, criar a sua própria cartografia de acordo com as novas “*Normas e Especificações Técnicas para a Cartografia Topográfica*

¹ Produtos capazes de serem adquiridos por um consumidor médio.

Vetorial e de Imagem” da DGT (DGT, 2020) e utilizar essa mesma informação é o que se irá estudar neste trabalho.

1.2 Objetivos

A realização deste trabalho de projeto está fundada em cinco objetivos fundamentais:

- A realização de levantamentos aerofotográficos através de UAS;
- Processamento das fotografias em ambiente *Pix4D Mapper* e verificar se a edição da nuvem de pontos influencia a qualidade dos produtos finais;
- Processamento das fotografias em ambiente *Photomod 5 Lite* e obtenção de informação geoespacial 2D e 3D;
- Organização dos dados geoespaciais de acordo com as “*Normas e Especificações Técnicas para a Cartografia Topográfica Vetorial e de Imagem*” da DGT, de abril de 2020;
- Validação da utilização de UAS para a aquisição, processamento e uso dos dados adquiridos.

A realização de levantamentos aerofotográficos compreende a obtenção de fotografias aéreas verticais a uma altitude de 120 m acima do solo – *Above Ground Level* (AGL).

O processamento das fotografias compreende a utilização de técnicas de orientação e ortorretificação de forma a obter modelos estereoscópicos e ortofotos reais, respetivamente.

Em ambiente *Pix4D Mapper* pretende-se processar as fotografias aéreas e verificar se a edição da nuvem de pontos influencia a qualidade dos produtos finais. Assim serão comparados resultados obtidos antes e depois da edição dessa nuvem de pontos. Os produtos geoespaciais espectáveis serão nuvens de pontos, Modelos Digitais de Elevação (MDE), nomeadamente Modelos Digitais de Superfície (MDS) e Modelos Digitais de Terreo (MDT), e curvas de nível com equidistância de 2 m.

Em ambiente *Photomod 5 Lite* pretende-se utilizar técnicas de estereorrestituição para obtenção de informação geoespacial 2D e 3D visível nos diferentes modelos estereoscópicos.

Por último, pretende-se validar a cartografia obtida por dados adquiridos por UAS através dos parâmetros de controlo de qualidade posicional da DGT.

1.3 Estrutura do trabalho de projeto

Este documento encontra-se estruturado em sete partes. A primeira parte consiste na introdução à temática abordada, através do seu enquadramento, e a apresentação dos objetivos definidos para a realização deste projeto.

A segunda parte compreenderá a definição dos conceitos de UAS e de Fotogrametria. Será também feita uma revisão de literatura sobre a utilização de UAS nas áreas da Fotogrametria e produção cartográfica.

A terceira parte – secções três a cinco – será de índole teórica. A terceira secção irá expor os conceitos necessários para a compreensão da temática abordada nesta tese. A quarta secção será referente aos UAS, abordando as categorias de operação europeias, será apresentada a solução UAS utilizada neste projeto e a legislação para a operação de UAS. Por fim, a quinta secção corresponderá aos sistemas de posicionamento. Nesta secção serão referidos os sistemas de posicionamento GNSS e RTK. Também nesta secção será abordada a temática dos Pontos Fotogramétricos (PF) e todas as suas componentes.

A quarta parte corresponderá à apresentação e enquadramento da área de estudo.

Na quinta parte será analisada a aplicação utilizada para o plano de voo – a *DroneDeploy*. Nesta análise serão identificados os pontos fortes e fracos da sua utilização e funcionamento.

A sexta parte será referente à metodologia adotada para a realização deste projeto. Assim, serão apresentados e descritos os *workflows* seguidos, aspetos relacionados com a execução do levantamento aerofotográfico – plano de voo, marcação de PF, *check-list* e equipamento utilizado – e os cálculos e valores de referência para o controlo de qualidade dos produtos cartográficos.

Por fim, a última parte corresponde à apresentação e discussão dos resultados, incluindo também as considerações finais do projeto.

2. Estado da arte

Nesta secção será abordado o conceito de Fotogrametria, de *Unmanned Aerial Systems* e o seu desenvolvimento sendo referidos diversos estudos onde são utilizados UAS. É também de referir que, no Anexo I, é feita uma síntese cronológica da utilização de UAS que complementa este capítulo.

2.1 Fotogrametria

A palavra Fotogrametria advém do grego *photon* [luz], *grafos* [escrita] e *metron* [medições], que significa efetuar medições através de fotografias (Brito & Coelho, 2002). Segundo os mesmos autores, o conceito de Fotogrametria é difícil de definir devido ao crescente desenvolvimento desta ciência e o consequente aumento das aplicações desta. No entanto, diversos autores definem fotogrametria como a “ciência e a tecnologia de obter informações seguras acerca de objetos físicos e do meio ambiente, através de processos de registo, medição e interpretação das imagens fotográficas.” (Loch *et al.*, 1998), “ciência e tecnologia de se restituir o espaço tridimensional, ou parte do mesmo (espaço-objeto), a partir de imagens bidimensionais, advindas da gravação de padrões de ondas eletromagnéticas (espaço-imagem), sem contato físico direto entre o sensor e o objeto ou alvo de interesse.” (Brito & Coelho, 2002) e “*the science and technique of interpreting and evaluating the form, dimension and position of objects by analyzing and measuring images of them.*” (Redweik, 2013).

A primeira aplicação da Fotogrametria data de 1849, pelo coronel Aimé Laussedaut, que utilizou fotografias terrestres para a criação de um mapa topográfico. O primeiro ensaio de fotografia aérea data de 1858 e foi levado a cabo pelo jornalista Félix Nadar, que utilizou um balão para sobrevoar e fotografar a cidade de Paris (Figura 2.1) a uma altitude de 80 m. Este feito foi visto com bons olhos pelo Imperador Napoleão III e, em 1859, ordenou a realização de um levantamento fotográfico de reconhecimento para a batalha de Solferino. A partir do ensaio de Nadar foram ensaiados mais métodos para obtenção de fotografia aérea, mas em 1903 a fotografia aérea viria a conhecer um período de desenvolvimento com a invenção do avião por parte dos irmãos Wright. A utilização do avião tornou-se a plataforma favorita para a obtenção de fotografias aéreas para a geração de bases cartográficas e para aplicações militares (Filipe, 2012).



Figura 2.1 - Voo de balão de Nadar.
[Filipe, 2012]

Segundo Prazeres *et al.* (2015), a observação em Geografia, seja ela direta ou indireta, de fontes primárias ou secundárias, é importante para a recolha e interpretação de informação geográfica. Assim, a Fotogrametria Aérea tornou-se desde muito cedo numa das técnicas mais utilizadas para a aquisição de geoinformação, produção e atualização de cartas topográficas, sendo e um recurso importante para os Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Segundo Redweik (2011), os levantamentos fotogramétricos possuem vantagens em comparação a outros processos de aquisição de dados geográficos. Entre elas estão a grande densidade de informação que se pode obter a partir de uma fotografia, a redução dos custos e aumento da eficiência, pois o tempo de trabalho de campo é menor e evita-se o retorno ao campo para recolha de novos dados.

A Fotogrametria pode ser dividida em dois ramos distintos, a Fotogrametria Aérea e a Fotogrametria Terrestre. Na Fotogrametria Aérea são utilizadas fotografias adquiridas através de câmaras, acopladas em aeronaves tripuladas ou não tripuladas (UAS), com o seu eixo ótico na vertical. Por outro lado, a Fotogrametria Terrestre utiliza fotografias obtidas por câmaras fixas sobre o terreno.

2.2 Definição de UAS

Em 2009, a *International Civil Aviation Organization* (ICAO) adotou a designação de UAS para nomear qualquer veículo voador sem piloto e todos os componentes necessários para a realização de uma missão (Prazeres *et al.*, 2015). No entanto existem outras designações na gíria e na literatura que se referem a esses mesmos veículos, nomeadamente a designação de “*drone*”, “*Unmanned Aerial Vehicle*” (UAV), “*Remotely Piloted Vehicle*” (RPV), “*Remotely Operated Aircraft*” (ROA), “*Remotely Piloted Aircraft Systems*” (RPAS), “*Remotely Piloted Aircraft*” (RPA), “Aeronave Remotamente Pilotada” (ARP) e “Veículos Aéreos Não-Tripulados” (VANT).

De acordo com o Regulamento Delegado (UE) 2019/945 da Comissão de 12 de março de 2019, entende-se por UAS “uma aeronave não-tripulada, acompanhada do equipamento para a controlar à distância” operada pelo seu operador ou piloto remoto “uma pessoa singular ou coletiva que utilize ou tencione utilizar um ou mais UAS” (Comissão Europeia, 2019a). De uma forma geral os UAS são veículos aéreos pilotados remotamente, caso o controlo seja feito de forma manual, ou controlados por *software* de piloto automático.

Esta designação de UAS pode fazer as designações anteriormente enumeradas desaparecer, havendo assim uma uniformização do conceito.

2.3 Desenvolvimento dos UAS

O desenvolvimento dos UAS foi fortemente motivado por razões militares (Eisenbeiss, 2004). Para além da utilização de balões de ar quente para efeitos de espionagem e reconhecimento foram também usados papagaios (Douglas Archibald (1887); Arthur Batut (1888); Lawrence and Myers (1906)), pombos (Neubronner (1903)) e foguetes (Alfred Maul (1904)) como plataformas não tripuladas para obtenção de fotografia aérea.

Após a Segunda Grande Guerra, vários países iniciaram programas secretos de UAS de forma a desenvolver um aparelho capaz de descolar, navegar e aterrar de forma autónoma, ser capaz de voar a baixas e a grandes altitudes, ter raios de ação que permitam operações a longa distância e capacidade de carga capaz de suportar desde sensores a objetos pesados. O principal objetivo era criar um equipamento capaz de realizar missões de vigilância, reconhecimento e penetração em terreno hostil, sem precisar de utilizar recursos humanos para zonas de alto risco e para obter informações que ajudassem nas decisões táticas e estratégicas (Eck, 2001; Eisenbeiss, 2004).

A utilização de materiais mais baratos para a construção das componentes, levou a: (1) maior competitividade no setor; (2) um desenvolvimento mais rápido das tecnologias; (3) maior quantidade de produtos no mercado. O desenvolvimento tecnológico permitiu a produção de UAS equipados com sistemas GNSS/IMU – necessários para a navegação e para garantir maior precisão – a um preço baixo para o consumidor geral (Eisenbeiss, 2004). Desta forma, os UAS têm sido cada vez mais usados para fins fotogramétricos. O sistema GNSS/IMU é composto pelo GNSS que regista informação em relação à posição e velocidade do aparelho e pelo IMU, o qual contém três acelerómetros ortogonais e três giroscópios ortogonais que são capazes de monitorizar as acelerações lineares e angulares do veículo. Este sistema permite obter informação acerca da posição, velocidade e atitude do UAS. A utilização de um sistema integrado de GNSS/IMU oferece um melhor comportamento em comparação com sistemas GNSS ou IMU usados individualmente (Noureldin et al., 2010). Segundo Noureldin et al., 2010, o sistema GNSS pode ser usado para atualizar o sistema IMU e melhorar a sua precisão e, por outro lado, o sistema IMU pode fornecer informações acerca da posição quando o sistema GNSS sofre interferências, ajudando na reaquisição do sinal GNSS e reduzindo o tempo de pesquisa necessário para detetar e corrigir as ambiguidades de ciclo. É capaz de fornecer informações acerca da atitude e tem taxas de dados mais altas que o GNSS.

Mais recentemente, a utilização de helicópteros-modelo como UAS teve alguma projeção tendo surgido, por fim, os modelos de UAS de asa fixa e de rotores. Uma súpula da evolução cronológica dos UAS é apresentada no Anexo I.

2.3.1 UAS de asa fixa e rotores

Os primeiros testes fotogramétricos com recurso a UAS de asa fixa foram feitos por Przybilla e Wester-Ebbinghaus em 1979. Estes testes foram realizados com um UAS controlado manualmente, com sistema de navegação *Lindhof Technika*, a uma altitude de 150 m e a uma velocidade de 11 m/s. O avião tinha 3 m de comprimento e 2.6 m de envergadura. Estes testes não foram bem sucedidos porque, a uma escala de 1:1000 e com uma velocidade do obturador de 1/1000s, a velocidade de voo e as vibrações causadas pelo motor fizeram com que as imagens ficassem desfocadas (Eisenbeiss, 2004). Devido à necessidade de uma pista para o avião, os autores propuseram a utilização de helicópteros para a realização de novos estudos.

Assim, Wester-Ebbinghaus em 1980, utilizou um UAS de asa giratória para a documentação de *Scwebebahn Wuppertal*, uma estrutura de metropolitano elevada. Este equipamento era capaz de voar entre os 10 e os 100 m e tinha o mesmo sistema de navegação utilizado no estudo de 1979. O helicóptero estava equipado com uma câmara de médio formato – *Rolleiflex SLX* – sobre uma plataforma com paredes de polistereno de forma a reduzir as vibrações do motor (Eisenbeiss, 2004).

Herwitz *et al.* (2002), usou um modelo de UAS de asa fixa de modo a testar a nova tecnologia *wireless* em conjunto com câmaras digitais. O UAS estava equipado com duas câmaras: uma Kodak/Hasselblad para imagens RGB (*Red Green Blue*); e uma DuncanTech que captava as bandas do espectro visível (RGB) e partes do espectro infravermelho (Eisenbeiss, 2009). Este teste tinha como objetivo demonstrar que era possível transferir remotamente fotografias 16 MB (*Megabyte*), das câmaras RGB, para um computador portátil baseado em terra, via *Ethernet* de banda larga *wireless* a velocidades de 1 a 4 MB por segundo a uma distância até 20 km, sem erros ou perda de dados. (Eisenbeiss, 2009). Esta técnica mostrou-se promissora para o levantamento de imagens via UAS de asa fixa, pois com este sistema, consegue-se adquirir mais informação e percorrer maiores distâncias em comparação com sistemas de rotores (Eisenbeiss, 2009).

Jizhou *et al.* (2004) desenhou e implementou um método de levantamento aéreo que permite obter as alturas e texturas dos edifícios a partir de uma só imagem (Jizhou *et al.*, 2004). O UAS utilizado

foi um mini UAS de asa fixa desenvolvido pela *Chinese Academy of Surveying and Mapping*, o *UAVRS-II RS System*, com uma câmara digital *Nikon D100* acoplada. Este modelo apresentava vantagens a nível de custo, obtinha imagens de alta resolução e tinha grande flexibilidade. No entanto, o seu peso fazia com que fosse difícil controlar o UAS e tirar fotografias na posição e orientação correta (Eisenbeiss, 2009; Jizhou *et al.*, 2004). Após vários testes, foi decidido que o UAS devia voar a 300 m de altitude e a câmara com uma inclinação de 45°. Visto que não era possível a utilização das imagens para a estereorrestituição, foi necessário o desenvolvimento de um algoritmo para o processamento da imagem. O desenvolvimento deste algoritmo permitiu então o uso de uma só imagem, em conjunto com uma base de dados SIG 2D, para a reconstrução de modelos 3D de edifícios (Jizhou *et al.*, 2004).

Wallace *et al.* (2012) realizou testes com um micro-UAS multi-rotor equipado com LiDAR para avaliar a viabilidade da utilização destes para a deteção de alterações nas florestas. Estes testes foram feitos numa plantação de eucaliptos *Nitens*, localizada perto da cidade de Franklin, na Tasmânia. Foi utilizado um UAS desenvolvido pela Universidade da Tasmânia, o *Oktokopter Droidworx/Mikrokoopter* equipado com um sistema de posicionamento e orientação, *laser scanning* (IEBO LUX) e um sistema de registo dos dados (Wallace *et al.*, 2012). Os testes foram realizados em quatro altitudes distintas e uma velocidade de 4 m/s. Desses voos foram obtidas oito nuvens de pontos as quais foram filtradas de forma a obter pontos de terreno e não terreno usando o método de Streutker e Gleen (Wallace *et al.*, 2012). Os pontos de terreno foram utilizados para gerar um MDT, e a altura dos pontos não-terreno foram obtidos a partir da subtração dos valores do MDT a cada diferente localização. Com a realização deste estudo, os autores chegaram à conclusão que voar a altitudes superiores a 50 m e utilizar ângulos maiores para o varrimento, deve ser evitado, pois quanto maior a altitude e ângulo de varrimento, maior distância os feixes têm de percorrer e menor é a probabilidade de voltarem à sua origem.

Taddia *et al.* (2017) apresentou uma abordagem para monitorizar os sistemas de dunas, entre Veneza e o rio Pó, através de fotografia aérea. Para isso, foram feitos quatro levantamentos entre novembro de 2015 e novembro de 2016 com um *DJI Phantom 2*, equipado com a câmara de origem, e um *DJI Phantom 3*, equipado com uma câmara RGB e uma câmara *low-cost* capaz de captar ondas NIR (*Near Infrared*), ambas com arranjo nadiral e com receptores GNSS em modo *Network Real Time Kinematic* (NRTK) (Taddia *et al.*, 2017). Foram utilizados entre 13 e 16 pontos de controlo e o processamento das imagens seguiu os princípios da reconstrução tridimensional automática *Structure from Motion* (SfM). No final, foram obtidos uma estimativa de densidade de vegetação através do cálculo do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), MDE, para cada levantamento, e foram feitas diferenças de elevação de forma a perceber as mudanças ocorridas.

Serra (2014) efetuou um estudo acerca do potencial da utilização de UAS para a atualização de cartografia municipal. O voo foi realizado a 11 de janeiro de 2013, na parte norte da vila de Sousel. O sistema utilizado foi um modelo *swinglet CAM* da *Sensefly*, equipado com uma *Canon IXUS 220HS* (RGB), com 12 *megapixels*² (MP). Com este estudo obtiveram-se vários MDS de forma a verificar o melhor método de interpolação (vizinho mais próximo, linear, vizinhos naturais, *Inverse Distance Weighting* (IDW), melhor triângulo), e um ortomosaico com uma resolução espacial de 3 cm e procedeu-se à análise da qualidade temática e posicional dos dados, bem como a influência PF. Efetuaram-se também vários testes ao processamento das imagens. Por fim, foi feito um questionário a produtores de cartografia para compreender o potencial da utilização de UAS para a atualização de cartografia topográfica e temática. Como resultados, o teste à qualidade posicional do MDS não foi totalmente conclusivo devido à falta de emissão de documentos normativos por parte da DGT. No entanto, o autor

² 1 MP equivale a aproximadamente 1.000.000 de *pixels*.

deduz que o MDS tem qualidade posicional devido à quantidade de pontos cotados automaticamente gerados e porque o ortomosaico, produto resultante do MDS, apresenta uma boa qualidade posicional. Quanto ao ortomosaico, este cumpre os requisitos da DGT para as escalas 1:2000 e 1:1000 “desde que os PF estejam bem dispostos pela área de interesse e os pontos de controlo se encontrem também dispostos nesta área” (Serra, 2014). Quanto à aplicabilidade de produção cartográfica e atualização de cartografia municipal, o autor afirma que os testes realizados apresentam resultados promissores, afirmando também que será necessário testar novos *softwares* de Fotogrametria, realizar um controlo posicional num número significativo de modelos, ser necessário realizar um teste prático de estereorrestituição dos elementos cartográficos, aferir a qualidade posicional dos dados e os seus custos associados. Este estudo assemelha-se à temática do presente projeto pela utilização de UAS para a obtenção de fotografias aéreas e utilização de técnicas fotogramétricas para a obtenção de produtos topo-cartográficos para produção, ou atualização, de cartografia de grande escala, podendo-se considerar que o atual projeto vem na continuação do referido.

3. Fundamentos teóricos

3.1 Projeto fotogramétrico

O projeto fotogramétrico é a “base de todos os processos fotogramétricos para a produção cartográfica” (Redweik, 2011). De acordo com a mesma autora, um projeto fotogramétrico (Figura 3.1) é constituído por três fases: o voo aerofotográfico, que inclui todas as tarefas desde o plano de voo, marcação e coordenação de PF e a análise da cobertura aerofotográfica; a fase de georreferenciação, fase em que se marcam pontos de apoio, determinam-se as coordenadas dos PF e se procede à Aerotriangulação; e, por fim, a fase de restituição que corresponde à extração de informação das fotografias aéreas através de métodos como a Estereorrestituição, Modelação 3D e Ortorretificação.

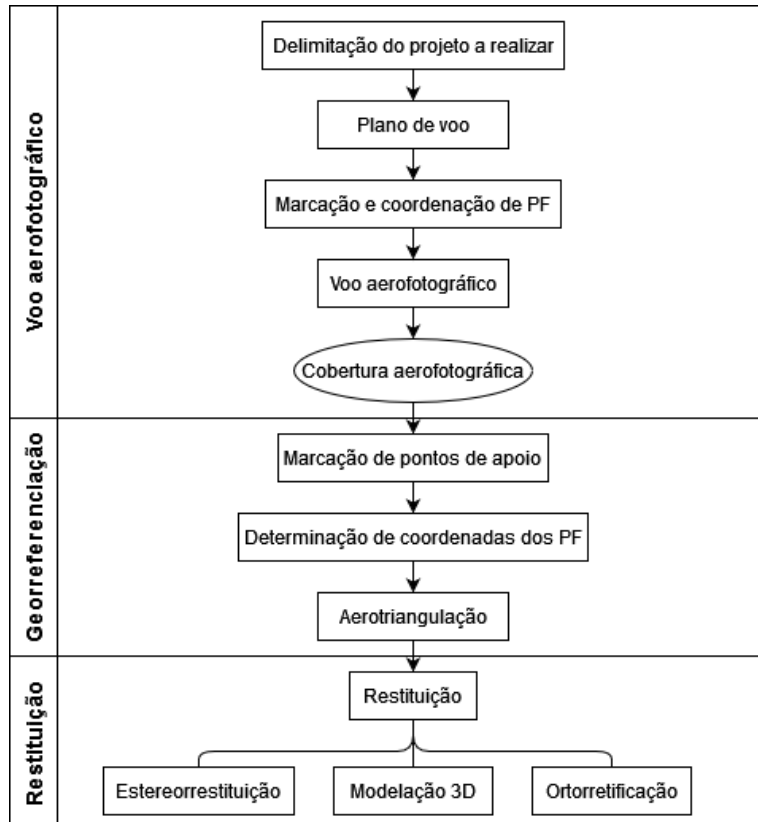


Figura 3.1 – Fases de um projeto fotogramétrico.
[Adaptado de Redweik, 2011]

3.2 Orientações fotogramétricas

“No momento em que uma fotografia é obtida a partir de uma câmara fotográfica existe uma relação única entre o objeto que está a ser fotografado e a imagem que se forma no interior da câmara” (Redweik, 2011). Esta relação é característica de cada fotografia e é definida através de um conjunto de parâmetros que permitem recuperar a relação espacial que existe entre a fotografia obtida e o objeto real. A recuperação desses parâmetros permite a extração de dados geométricos precisos de um objeto na fotografia. Este processo de “determinação dos parâmetros e recuperação desta relação espacial tem o nome de orientação fotogramétrica” (Redweik, 2011).

Na Fotogrametria existem quatro tipos de orientações fotogramétricas. Estas orientações são designadas como orientação interna, orientação externa, orientação relativa e orientação absoluta.

Nesta secção será dado ênfase às orientações interna e externa.

3.2.1 Orientação Interna

A Orientação Interna (OI) permite a recuperação da posição das fotografias no interior da câmara no momento em que a fotografia foi tirada e a reconstrução do feixe perspetivo dos raios luminosos que permitiram a obtenção da fotografia (Redweik, 2011). Para isso é necessário a reconstrução do sistema interno câmara-imagem do momento em que as fotografias foram obtidas, para se efetuarem medições sobre as imagens utilizando o sistema de coordenadas píxel.

Esta orientação é constituída pelos parâmetros da constante da câmara (c) e pelas coordenadas foto do ponto principal (x_0 e y_0). Para além destes, incluem-se também funções que permitem descrever as distorções causadas pelo sistema de lentes da objetiva, nomeadamente a distorção radial e a distorção tangencial, causada pela descentragem das diversas lentes (Redweik, 2011).

A recuperação da OI nas fotografias analógicas que foram digitalizadas, assenta numa transformação geométrica entre dois sistemas de coordenadas, o sistema de coordenadas píxel e o sistema de coordenadas foto, definido pelas marcas fiduciais presentes no plano imagem (Redweik, 2011). Esta transformação é feita através da medição das coordenadas píxel das marcas fiduciais e da correspondência com as coordenadas foto das mesmas, cuja localização em milímetros a partir do ponto médio da fotografia está presente no certificado de calibração da câmara utilizada. Por outro lado, nas imagens obtidas por câmaras digitais, como é o caso da câmara acoplada ao *DJI Phantom 4 Pro*, as fotografias não têm marcas fiduciais e não é dado um certificado de calibração. A recuperação da OI nestes casos pode ser obtida a partir de auto-calibração em *softwares* de processamento fotogramétrico como o *Pix4D Mapper*.

3.2.2 Orientação Externa

A Orientação Externa (OE) refere-se a um conjunto de parâmetros que definem a posição e a orientação do eixo fotográfico no espaço objeto no momento em que se adquiriu a imagem. Esses parâmetros correspondem às coordenadas objeto do centro de projeção (X_0, Y_0, Z_0) e a três ângulos de atitude da plataforma (Figura 3.2) que representam a relação entre os sistemas de coordenadas foto e o sistema de coordenadas objeto. Estes ângulos denominam-se ω , ϕ , κ respectivamente, “onde ω é um

ângulo de rotação em torno do eixo dos XX , ϕ um ângulo de rotação em torno do eixo dos YY e κ um ângulo de rotação em torno do eixo dos ZZ do sistema de coordenadas objecto” (Redweik, 2011).

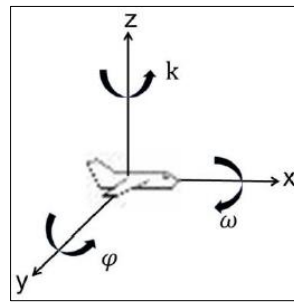


Figura 3.2 – Ângulos de atitude do avião ω , ϕ , κ .
[Rosa, 2013]

Existem três métodos para determinar os parâmetros da OE das fotografias aéreas, nomeadamente os métodos semi-direto, direto e indireto. No método semi-direto é calculada a posição espacial do centro de projeção através das observações GNSS durante o voo.

No método direto é possível obter os seis parâmetros de orientação, para determinar a posição espacial do centro de projeção e atitude do avião, sem ser necessário realizar aerotriangulação ou apoio geodésico. Isto é possível graças ao sistema GNSS/IMU que é usado durante o voo. No entanto, este sistema requer a calibração do desfasamento existente entre a antena GNSS e o centro de projeção da câmara e do desalinhamento entre os eixos de coordenadas da IMU e os eixos de coordenadas foto.

Por último, no método indireto os parâmetros da OE podem ser determinados através de dois procedimentos distintos, nomeadamente através da interseção inversa espacial de, no mínimo, três PF não colineares presentes em cada fotografia e o segundo através de aerotriangulação por feixes perspetivos, processo esse cuja precisão depende da quantidade e distribuição de PF num bloco fotográfico regular. Neste método é usado o modelo geométrico da projeção central, traduzido pelas equações de colinearidade.

As equações de colinearidade representam uma base para a fotogrametria digital, sendo capaz de expressar a relação existente entre as coordenadas foto e as coordenadas objeto de um mesmo ponto. A condição de colinearidade (Figura 3.3) pressupõe que o centro de projeção CP, o ponto imagem P' e o ponto objeto P estão em linha reta na altura em que a fotografia foi tirada.

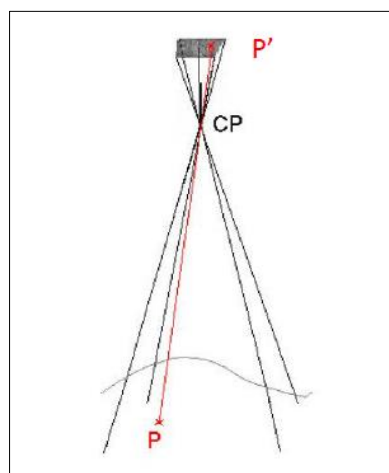


Figura 3.3 – Condição de colinearidade.
[Filipe, 2012]

Brito e Coelho (2002), e Oliveira (2003), descrevem detalhadamente o desenvolvimento e aplicação das equações de colinearidade que serão apresentadas:

(3.1)

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ -c \end{bmatrix} = \lambda_P \begin{bmatrix} R_{11} & R_{21} & R_{31} \\ R_{12} & R_{22} & R_{32} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_P - X_{CP} \\ Y_P - Y_{CP} \\ Z_P - Z_{CP} \end{bmatrix}$$

Partindo das equações expressas anteriormente, dividindo as duas primeiras equações pela terceira, o fator de escala λ_P é eliminado, resultando em duas equações de colinearidade:

(3.2)

$$x_P = -c \frac{(X_P - X_{CP})R_{11} + (Y_P - Y_{CP})R_{12} + (Z_P - Z_{CP})R_{13}}{(X_P - X_{CP})R_{31} + (Y_P - Y_{CP})R_{32} + (Z_P - Z_{CP})R_{33}}$$

(3.3)

$$y_P = -c \frac{(X_P - X_{CP})R_{21} + (Y_P - Y_{CP})R_{22} + (Z_P - Z_{CP})R_{23}}{(X_P - X_{CP})R_{31} + (Y_P - Y_{CP})R_{32} + (Z_P - Z_{CP})R_{33}}$$

Tabela 3.1 – Parâmetros das equações de colinearidade.

Descrição	Parâmetro
Coordenadas imagem do ponto P.	x_P, y_P
Constante da câmara.	c
Constante de proporcionalidade, correspondente ao fator de escala.	λ_P
Coefficientes da matriz de rotação, definidos pelos ângulos de Euler – ω , ϕ , κ – que transformam o sistema de coordenadas terreno em sistema de coordenadas imagem.	R_{11}, \dots, R_{33}
Coordenadas terreno no ponto P.	X_P, Y_P, Z_P
Coordenadas terreno no centro de projeção	X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}

3.3 Aerotriangulação

De acordo com Redweik (2010), a aerotriangulação (AT) pode-se definir como um conjunto de algoritmos matemáticos e estatísticos usados para a determinação das coordenadas terreno de pontos de apoio das fotografias e das orientações externas das fotografias, a partir das coordenadas terreno de um número reduzido de PF.

Neste projeto, o processo de georreferenciação foi realizado pelo método indireto por aerotriangulação recorrendo ao *software Pix4D Mapper* na fase do processamento inicial das fotografias aéreas – secção 8.3. Este *software* utiliza a Aerotriangulação Automática (ATA) - *Automatic Aerial Triangulation* (AAT) – e a Aerotriangulação em Bloco por Feixes Perspetivos – *Bundle Block Adjustment* (BBA). A ATA pressupõe a deteção automática de pontos conspícuos em cada imagem e a correspondência automática entre pontos homólogos nas várias fotografias. O *Pix4D* utiliza o algoritmo *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT) para realizar estas operações (Kim, 2019). O BBA é aplicado a seguir para calcular e otimizar as orientações interna – por auto-calibração – e externa das fotografias usando a informação dos pontos de controlo e os parâmetros da câmara fotográfica que entram como valores aproximados. Os valores otimizados da orientação externa e dos parâmetros internos da câmara serão mais tarde utilizados para a orientação das fotografias em ambiente *Photomod 5 Lite* – secção 8.4.

3.4 Modelos Digitais de Elevação

Os MDE descrevem o relevo da superfície terrestre, existindo diversas designações na literatura e em *software*, sendo as mais usadas:

– *Digital Terrain Model* (DTM) – Modelo Digital de Terreno (MDT);

- *Digital Surface Model (DSM)* – Modelo Digital de Superfície (MDS);
- *Digital Height Model (DHM)* e *Digital Elevation Model (DEM)* – termos genéricos para MDS e MDT.

Embora os conceitos de MDT e MDS possam induzir ao mesmo, existe uma clara diferença entre estes dois conceitos, o primeiro descreve o relevo ao nível do terreno, ignorando qualquer objeto sobre ele (Redweik, 2011), como por exemplo o edificado e zonas arborizadas, enquanto que o segundo descreve todo o relevo, incluindo todos os seus elementos (Figura 3.4).

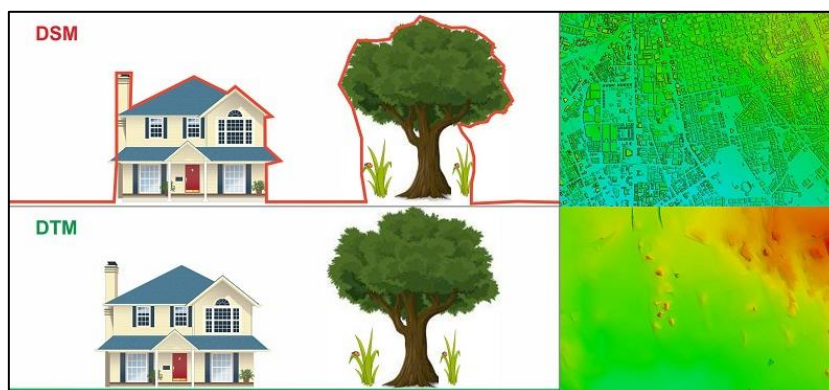


Figura 3.4 – Diferença entre MDT e MDS.
[SATPALDA, 2021]

Segundo Redweik (2011), o MDT é importante para a cartografia de traço, enquanto que para a ortorretificação de zonas urbanas o MDS dá garantias de melhores resultados.

A descrição do terreno pode ser feita através de curvas de nível³, perfis⁴, conjuntos de pontos cotados (distribuídos de forma regular ou irregular sobre um plano XY) e através de superfícies contínuas multifacetadas, ou seja, compostas por planos adjacentes de orientação espacial variável, ou por um conjunto de superfícies com curvatura variável limitadas por figuras geométricas regulares no plano XY (Redweik, 2011). A esta superfície dá-se o nome de MDE.

O MDE é uma função contínua (3.4) capaz de descrever o relevo de uma região, fornecendo um valor de cota para cada ponto de coordenadas planimétricas (X, Y) (Redweik, 2011).

(3.4)

$$Z = f(X, Y)$$

A precisão de um MDE depende do nível de densidade e da distribuição dos pontos que constituem os dados primários para o modelo, do terreno e do método utilizado para a construção do mesmo.

Existem vários métodos para a obtenção de dados primários para a construção de um MDE, nomeadamente a estereofotogrametria, que pressupõe a restituição de curvas de nível, perfis ou pontos de cota isolados presentes num modelo estereoscópico, LiDAR, InSAR (*Interferometric Synthetic-Aperture Radar*) e a correspondência automática de imagens (Redweik, 2011). Essa correspondência será a técnica utilizada neste projeto através do *software Pix4D* que permite determinar automaticamente os pontos homólogos das fotografias e gerar os MDE.

³ Linhas de cota constante e orientação variada no plano XY

⁴ Linhas de orientação constante no plano XY e cota variável

Para a criação de um MDT os dados podem ser modelados em dois formatos distintos, nomeadamente o formato *Triangular Irregular Net* (TIN) e o formato GRID⁵. No primeiro, é gerada uma rede de triângulos sobre uma amostra de pontos cotados, de distribuição irregular. Neste formato, o método de triangulação mais comum é a triangulação de Delaunay na qual os triângulos são definidos de forma a que o círculo que passa pelos três vértices de qualquer triângulo não contém qualquer outro ponto da amostra. No formato GRID existem dois tipos de abordagem que dependem da distribuição dos pontos cotados. Caso a amostra tenha uma distribuição irregular, é necessário a criação de um modelo TIN e a partir deste são interpoladas cotas de pontos. Se a amostra apresentar uma distribuição regular pode ser usada para a criação do modelo, sem sofrer alterações, a menos que se queira mudar de resolução. Este modelo pode ser “composto por células regulares de cota constante no seu interior e igual à do ponto da amostra, ou então por uma malha regular cujos nodos são os pontos da amostra com as respetivas cotas” (Redweik, 2011).

Sendo assim, a estrutura TIN adequa-se à irregularidade das amostras de pontos cotados recolhidos por métodos topográficos e fotogramétricos, enquanto que o método GRID necessita de uma amostra de pontos regularmente espaçados, com distribuição em quadrícula e espaçamento fixo (Filipe, 2012).

Neste trabalho, a criação do MDT é feita automaticamente pelo *software Pix4D Mapper*, utilizando o MDS gerado como dados de entrada e calculando, através de uma máscara de classificação (utilizando apenas os pontos classificados como *Ground* e *Road Surface*), o MDT.

3.5 Ortorretificação de fotografias aéreas

A existência das deformações geométricas existentes nas fotografias aéreas do terreno são consequência da sua projeção central, da inclinação do eixo ótico (originando distorções projetivas) e do relevo do terreno (originando distorções perspetivas) (Casaca *et al.*, 2005; Redweik, 2011).

Uma ortofoto é uma representação do pormenor do objeto – terreno – na sua posição planimetricamente correta, apresentando tanta densidade de informação como a fotografia original (Redweik, 2011). Este produto é obtido através da ortorretificação.

Segundo Redweik (2011), a principal diferença existente entre uma fotografia aérea e uma ortofoto (Figura 3.5) é que uma fotografia aérea é tirada sob uma projeção central e a ortofoto é uma projeção ortogonal do terreno. A geração de uma ortofoto tem como objetivo eliminar as influências negativas da projeção central da representação do terreno de modo a que se obtenha um produto com informação visual densa do terreno com a geometria rigorosa de escala homogénea característica de uma carta (Redweik, 2011).

⁵ Formato de dados *raster* da ESRI.

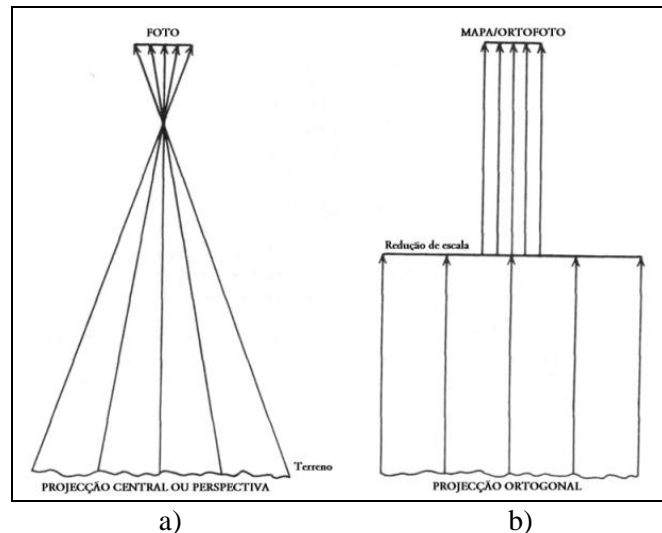


Figura 3.5 – Projeções fotográficas. a) Projeção Central; b) Projeção ortogonal.
[Redweik, 2011]

O método de retificação digital consiste na transformação de fotografias, em formato digital, em ortofotos digitais recorrendo às equações de colinearidade aplicadas sucessivamente a todos os pixels constituintes da fotografia.

A aplicação deste método requer como dados de entrada as fotografias aéreas – em formato digital – o MDT e os parâmetros da OI e OE de cada fotografia. Poderão ser utilizados PF para a determinação da OE, se existirem, no mínimo, três visíveis em cada fotografia.

Existem dois tipos de processamento analítico utilizados na retificação digital (Figura 3.6): o método direto e o método indireto. Apesar da existência de dois tipos de processamento analítico será apenas dado ênfase ao método indireto por ser o mais utilizado.

No método indireto, parte-se da posição T de cada pixel na imagem a ser criada (Figura 3.6), correspondente a coordenadas terreno (X, Y), interpola-se o Z do MDT/MDS, e é calculada a posição T' correspondente na imagem original pelas equações de colinearidade, à qual se vai buscar o valor de cinzento a ser atribuído à posição T. Esse valor de cinzento é normalmente interpolado a partir dos valores vizinhos, porque a posição T' calculada geralmente não coincide com o centro de nenhum pixel (Redweik, 2011).

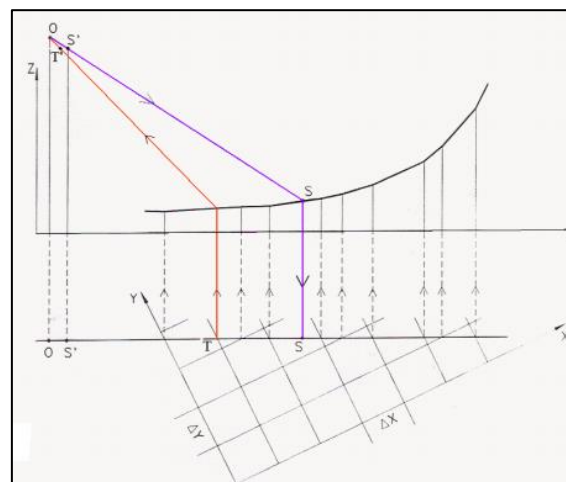


Figura 3.6 – Ortoretificação digital: Direta (lilás) e Indireta (vermelho).
[Redweik, 2011]

A utilização de um MDS, em detrimento do MDT, permite gerar uma ortofoto real, ou seja, uma ortofoto em que todos os objetos, incluindo os que se elevam acima do terreno (edifícios, árvores, etc.) estão representados pela sua projeção ortogonal no plano horizontal (Redweik, 2011).

3.6 Estereorrestituição

A estereorrestituição pode ser definida como o processo de aquisição de dados tridimensionais a partir de modelos estereoscópicos. Os modelos estereoscópicos são formados por um par de fotografias do mesmo objeto obtidas a partir de diferentes perspectivas com a orientação relativa original recuperada.

O processo de estereorrestituir com fins cartográficos é feito com os estereorrestituidores, aparelhos que permitem a aquisição de informação 3D do terreno georreferenciada a partir de fotografias em formato analógico ou digital. Segundo Redweik (2011), uma estação restituidora é constituída por componentes que permitem: (1) receber as fotografias (*input*); (2) determinar as orientações dos pares estereoscópicos; (3) visualizar em 3D; (4) medir em 3D a partir de uma marca flutuante e (5) registar os dados restituídos (*output*).

O processo de estereorrestituição é feito sobre cada par estereoscópico da cobertura fotográfica, sendo necessária a recuperação das OI, OE e relativa desses mesmos pares.

4. Unmanned Aerial Systems

Esta secção abordará as categorias de operação dos UAS, uma definição e comparação de modelos de UAS quadricopteros e de asa fixa e será também apresentada a plataforma utilizada para a realização dos levantamentos aerofotográficos do projeto. Será ainda feita uma súmula da legislação em vigor para a operação de UAS em território nacional e dentro da União Europeia.

4.1 Categorias de operação de UAS

A Comissão Europeia publicou, a 24 de maio de 2019, o Regulamento de Execução 2019/947 relativo às regras e aos procedimentos para a operação de aeronaves não tripuladas com o objetivo de estabelecer “disposições pormenorizadas com vista à operação de sistemas de aeronaves não tripuladas, assim como para o respetivo pessoal, incluindo os pilotos à distância e as organizações envolvidos nessas operações.” (Europeia Comissão, 2019b). Assim existem três categorias de operação de UAS – categoria aberta, categoria específica e categoria certificada.

4.1.1 Categoria aberta

Na categoria aberta são esperadas operações que apresentem menores riscos em relação ao solo e no ar. A segurança destas operações é assegurada por um conjunto reduzido de regras, limitações operacionais, melhores práticas da indústria convertidas em normas e requisitos de determinados equipamentos e funcionalidades do UAS (Matias, 2016).

Segundo o mesmo autor, o propósito desta categoria “é definir objetivamente os limites operacionais onde as operações serão realizadas e manter o limiar destes tão baixo quanto possível, preferencialmente com regras de aviação e processos muito limitados, face ao baixo risco da operação em causa.” (Matias, 2016).

4.1.2 Categoria específica

A categoria específica lida com operações de médio risco. Nesta categoria, a operação de uma aeronave está condicionada à autorização da autoridade aeronáutica civil do país em que se irá operar,

mediante a análise da avaliação de risco da operação elaborada pelo operador e do Manual de Operações que visa descrever toda a operação (Matias, 2016).

Ao contrário da categoria aberta, nesta categoria o risco da operação aumenta devido a fatores como a partilha do espaço aéreo com aeronaves tripuladas, a possibilidade de realizar operações *Beyond Visual Line-Of-Sight* (BVLOS), a utilização de UAS de maior dimensão e pelo facto de poderem sobrevoar áreas restritas, mediante autorização.

4.1.3 Categoria certificada

Por último, a categoria certificada é aplicada sempre que a autoridade competente do país, com base na avaliação do risco do artigo 11º do Regulamento de Execução (UE) 2019/947, considere que o risco da operação não possa ser atenuado sem a devida certificação do UAS e do seu operador, sempre que aplicável (Comissão Europeia, 2019b).

Nesta categoria assume-se que o risco de operação do UAS seja maior do que nas anteriores categorias. No regulamento anteriormente referido, é aplicada a categoria certificada caso a operação seja efetuada sobre ajuntamentos de pessoas, envolva transporte de pessoas e envolva o transporte de mercadorias perigosas que possam resultar num elevado risco em caso de acidente (Comissão Europeia, 2019b).

4.2 Tipos de UAS

4.2.1 Quadricoptero

A estrutura de quadricoptero é geralmente utilizada nos UAS de pequena dimensão (Luukkonen, 2011). São constituídos por quatro rotores que se encontram posicionados horizontalmente com a mesma distância ao centro de massa do equipamento que giram para a mesma direção, tornando o equipamento mais estável (Syring & Nylund, 2018). Hoje existe uma vasta gama de UAS e fabricantes no mercado. Neste momento a DJI é a companhia líder neste mercado, oferecendo equipamentos capazes de responder às mais variadas necessidades.

Os modelos *Phantom* são os modelos mais populares e conhecidos pelo público em geral e por profissionais na área dos UAS. Neste momento a série *Phantom* tem disponíveis três modelos, considerados *consumer grade* – *Phantom 3 SE*, *Phantom 4 Advanced*, *Phantom 4 Pro V2.0* – no entanto existem também dois modelos de categoria *enterprise*⁶, nomeadamente o *Phantom 4 RTK* – que inclui uma estação RTK⁷ para melhor precisão do GNSS – e o mais recente *Phantom P4 Multispectral* com uma câmara multiespectral e um módulo RTK. É importante referir que o modelo *Phantom 4 Pro* foi descontinuado dando o lugar ao sucessor *Phantom 4 Pro V2.0* que mantém as especificações à excepção do peso, que passou dos 1388 g para os 1375 g.

O *DJI Phantom 4 Pro* (Figura 4.1) pode ser considerado um UAS de pequena dimensão usado para fins de lazer, mas também é muito popular para efetuar levantamentos fotográficos profissionais. Equipado com uma camara fotográfica com sensor de 1 polegada de 20 MP – 1” CMOS

⁶ Produtos profissionais indicados para organizações.

⁷ *Real-Time Kinematic*

(*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) – este modelo é capaz de tirar fotografias, gravar vídeos a resolução 4K e suporta sistemas de autopiloto – abordado na secção 7.



Figura 4.1 – DJI Phantom 4 Pro
[DJI, 2021]

4.2.2 Asa fixa

Os modelos de UAS de asa fixa têm um funcionamento semelhante a uma aeronave convencional. Estes contêm as asas para a sua navegação e um, ou mais, motores para se mover e descolar. Os UAS de asa fixa têm diversas vantagens como a capacidade de sobrevoar grandes áreas, voar distâncias mais longas e é capaz de economizar bateria desligando o rotor durante o voo por um curto período de tempo, nomeadamente durante a captação de cada fotografia para evitar vibrações.

Como aspetos negativos, os UAS de asa fixa não têm a capacidade de pairar no ar ou descolar verticalmente – a não ser que sejam híbridos⁸ – precisando muitas vezes de acessórios extra, como catapultas, para levantar voo, ou obrigam o piloto remoto a lançar o equipamento, o que implica não só gastos extra na compra do sistema de catapulta bem como conhecimento por parte do operador ao lançar o UAS para não o danificar. Alguns modelos mais recentes têm um sistema de descolagem automática, no entanto o preço é maior, tornando estes UAS apenas indicados para empresas ou profissionais no setor. Outro aspeto negativo tem a ver com a velocidade dos UAS de asa fixa. Estes deslocam-se a uma velocidade mínima maior que os quadricopteros e atingem velocidades até aos 110 km/h. Este aspeto pode afetar a qualidade das fotografias em situações de pouca luminosidade, má configuração da câmara fotográfica – nomeadamente velocidade do obturador, abertura do diafragma e ISO – resultando em fotografias desfocadas.

Como exemplo destes UAS, pode ser mencionado um dos modelos de asa fixa da companhia *SenseFly*, o *SenseFly eBee X* (Figura 4.2). Este UAS tem um peso entre os 1.1 kg e 1.4 kg – dependendo da câmara e bateria instalada – atinge velocidades entre os 11 e os 30 m/s e resiste a ventos até os 12.8 m/s. A nível da autonomia consegue voar até 90 minutos. Por fim, este modelo é capaz de efetuar aterragens de forma automática.



Figura 4.2 – SenseFly eBee X
[SenseFly, 2021]

⁸ UAS provido de asa fixa e rotores.

4.2.3 Quadricoptero vs asa fixa

Analisados os UAS quadricopteros e os de asa fixa, é o momento de comparar ambos os conceitos e perceber qual é o mais indicado para este projeto para o levantamento fotográfico. Na Tabela 4.1 está uma comparação entre os quadricopteros e os UAS de asa fixa.

Tabela 4.1 – Quadricopteros vs Asa fixa. As bolas a verde são atribuídas às características em que determinado tipo de UAS é superior a outro; as bolas vermelhas correspondem ao oposto.

	Quadricoptero	Asa Fixa
Autonomia	●	●
Distância	●	●
Velocidade	●	●
Capacidade de Pairar	●	●
Descolagem	●	●
Aterragem	●	●
Conhecimento	●	●
Preço	●	●

Como referido na secção 4.2.2, os modelos de asa fixa têm melhores desempenhos no que toca à autonomia do equipamento, visto que os quadricopteros têm de ter os rotores em constante funcionamento, o que provoca mais desgaste da bateria durante o voo. Os modelos de asa fixa permitem que o motor se desligue várias vezes durante o voo, aproveitando a vantagem de planar para economizar bateria. No que toca à distância máxima que consegue voar, os modelos de asa fixa permitem realizar missões de áreas maiores que os quadricopteros.

Em relação à velocidade, os quadricopteros atingem uma velocidade inferior aos de asa fixa, no entanto os quadricopteros têm a vantagem de obter melhores resultados em condições com menor luminosidade, pela sua capacidade de pairar e pela sua velocidade menor.

No que toca à descolagem e aterragem dos UAS, os quadricopteros conseguem realizar estas duas tarefas de forma autónoma, enquanto que os de asa fixa têm de ser lançados – pelo piloto remoto ou através de catapulta (a não ser que sejam modelos híbridos) – e, na maior parte dos modelos, necessita de auxílio na aterragem. Há ainda o conhecimento necessário para operação dos UAS. A operação de um UAS de asa fixa é mais complexa que a operação de um quadricoptero. Para a operação de um quadricoptero, o piloto remoto não precisa de saber pilotar o aparelho – apesar de dever saber pilotar o aparelho para responder a eventuais contrariedades. Apenas é necessário ter o conhecimento de plano de voo e ordenar o começo da missão, enquanto que para a operação de uma asa fixa, é necessário saber planear um voo, saber como lançar o UAS e como o recuperar no fim da missão.

Por fim, o preço necessário para adquirir um quadricoptero é, em geral, significativamente mais baixo que os modelos de asa fixa. Esta diferença de preço ocorre porque o sistema GNSS/IMU dos quadricopteros *consumer grade* é inferior aos instalados nos modelos de asa fixa, assim como a câmara.

Feita esta comparação, foi decidido que a estrutura de UAS a ser utilizada seriam os quadricopteros devido à grande diferença de preço e pela falta de conhecimento no manuseamento de sistemas de asa fixa. Assim sendo, o UAS utilizado neste projeto foi o *DJI Phantom 4 Pro*.

4.3 Legislação

Nesta secção serão referidos documentos essenciais para compreender a legislação existente para a operação de UAS em território nacional e na União Europeia.

4.3.1 Convenção de Chicago

A Convenção de Chicago, coordenada pelos Estados Unidos da América a 1 de novembro de 1944, reuniu representantes de cinquenta e dois países e teve como objetivo a “criação de uma nova organização internacional para a aviação civil que tomasse a seu cargo a elaboração de um regime jurídico internacional para a navegação aérea” (Prazeres, 2018).

Após sete semanas de Convenção resultou um documento nuclear para a aviação, a Convenção sobre Aviação Civil Internacional em que se prevê a criação da ICAO que iniciava a sua vigência com carácter provisório, situação que se manteve até terem sido depositadas 26 ratificações necessárias ao início da contagem de 30 dias para entrar em vigor, o que ocorreu a 4 de abril de 1947 (Santos, 1996).

Portugal aprovou esta convenção através do Decreto-Lei n.º 36:158, de 17 de fevereiro de 1947 e ratificado a 28 de abril de 1948 estabelecendo no artigo 1.º que os “Estados contratantes reconhecem que cada Estado tem a soberania completa e exclusiva sobre o espaço aéreo que cobre o seu território” (Diário do Governo, 1947).

Nesta convenção foram também referidas aeronaves não-tripuladas, no sentido de que a sua utilização deve ser regulada por cada estado, evitando qualquer tipo de perigo a aeronaves civis – através do artigo 8.º.

4.3.2 Regulamentação europeia em vigor

Atualmente a regulamentação em vigor para a operação de UAS, na União Europeia, está assente nos seguintes regulamentos:

– O Regulamento (UE) 2018/1139, de 4 de julho de 2018, relativo às regras comuns da aviação civil, teve como um dos objetivos “Contribuir para a política da União mais abrangente no domínio da aviação e para a melhoria do desempenho global do setor da aviação civil” (Parlamento Europeu, 2018). Este regulamento resultou na criação da Agência Europeia para a Segurança da Aviação (EASA⁹).

– O Regulamento Delegado (UE) 2019/945 da Comissão, de 12 de março de 2019, é relativo aos UAS e aos operadores, de UAS, de países terceiros. Este regulamento estabelece os requisitos de conceção e fabrico de UAS que sejam postos a funcionar de acordo com o Regulamento de Execução (UE) 2019/947, regras para a colocação no mercado e a livre circulação na EU de UAS e as regras aplicáveis aos operadores de UAS de países terceiros (Comissão Europeia, 2019).

– O Regulamento de Execução (UE) 2019/947 da Comissão, de 24 de maio de 2019, que estabelece disposições pormenorizadas para a operação de UAS, incluindo o pessoal envolvido nas mesmas operações – piloto remoto, operador UAS e outras organizações envolvidas (Comissão Europeia, 2019a).

– O Regulamento Delegado (UE) 2020/1058, de 27 de abril de 2020, visa a alteração do regulamento anterior no que respeita à introdução de duas novas classes de UAS passando de 5 classes previstas no Regulamento Delegado 2019/945 – C0, C1, C2, C3 e C4 – para 7 classes – C0, C1, C2, C3, C4, C5 e C6.

Desde 31 de dezembro de 2020 que a legislação da operação de UAS está em período de transição. Este período de transição termina a 31 de dezembro de 2022, entrando em vigor a nova legislação a 1 de janeiro de 2023.

⁹ *European Union Aviation Safety Agency* – responsável pela legislação europeia para a aviação civil.

Com este período de transição entraram também em vigor os Regulamentos de Execução (UE) 2020/639 da Comissão, de 12 de maio de 2020 e o Regulamento de Execução (UE) 2020/746 da Comissão, de 4 de junho de 2020. Estes dois regulamentos dizem respeito aos cenários de referência para operações VLOS¹⁰ ou BVLOS (Comissão Europeia, 2020) e à prorrogação das datas de aplicação estipuladas no Regulamento de Execução (UE) 2019/947 devido à pandemia do SARS-CoV-2 (Comissão Europeia, 2020a), respetivamente.

4.3.3 Operação de UAS em território nacional

4.3.3.1 Regulamento n.º 1093/2016

O Regulamento n.º 1093/2016, de 14 de dezembro, relativo às condições de operação aplicáveis aos sistemas de aeronaves civis pilotadas remotamente – *Remotely Piloted Aircraft Systems* (RPAS) – da autoria da Autoridade Nacional da Aviação Civil (ANAC), alberga um conjunto de regras e obrigações para a operação de UAS em espaço aéreo civil (ANAC, 2016).

Este regulamento tem como objetivo definir normas e condições de operação de UAS no espaço aéreo nacional, tendo em conta as normas de organização do espaço aéreo e as regras do ar presentes no Regulamento de Execução (UE) n.º 923/2012.

Importa mencionar a importância do artigo 3.º, referente às regras gerais de operação de um UAS. Ao operar um UAS o piloto remoto deve realizar voos diurnos, em operações VLOS até aos 120 metros, os voos devem ser realizados a uma distância segura de bens e conjuntos de pessoas e operar com luzes de sinalização. Este artigo menciona no n.º 10 que a operação em áreas com CTR¹¹, ATZ¹² ou TRMZ¹³ associadas pode evoluir até ao limite máximo vertical dessas áreas.

Existe a possibilidade dos voos de UAS necessitarem da autorização da ANAC, estas condições estão previstas no artigo 10.º, assim de acordo com os n.ºs 1 e 3 carece de autorização da ANAC voos noturnos, operações BVLOS, voos acima dos 120 metros e operação de UAS com MTOM superior a 25 kg.

O presente regulamento também prevê as restrições à operação ou voo de UAS através do artigo 11.º. Algumas dessas restrições são: concentrações de pessoas, áreas consideradas proibidas em zonas de sinistro, sobre instalações em que estejam sedeados órgãos de soberania, sobre áreas proibidas, perigosas, restritas, reservadas e temporariamente reservadas de espaço aéreo (ANAC, 2016), entre outras restrições.

4.3.3.2 Regulamento de Execução (UE) n.º 923/2012

O Regulamento de Execução (UE) n.º 923/2012, de 26 de setembro de 2012, tem como objetivo estabelecer as regras de ar comuns e as disposições operacionais aos serviços e procedimentos de

¹⁰ *Visual Line-Of-Sight*

¹¹ *Control Zone* (Zona de controlo) – “espaço aéreo controlado que se prolonga no sentido ascendente a partir da superfície terrestre até um limite superior especificado” (Regulamento n.º 1093/2016 Da Autoridade Nacional Da Aviação Civil, 2016)

¹² *Aerodrome Traffic Zone* (Zona de tráfego do aeródromo) – “espaço aéreo de dimensões definidas, estabelecido em torno de um aeródromo para proteger o tráfego desse aeródromo” (Regulamento n.º 1093/2016 Da Autoridade Nacional Da Aviação Civil, 2016)

¹³ *Transponder Radio Mandatory Zone* (Zona de equipamento transponder e rádio obrigatório) – “espaço aéreo de dimensões definidas no qual é obrigatório dispor de e utilizar equipamento transponder para comunicar a altitude de pressão e equipamento rádio” (Regulamento n.º 1093/2016 Da Autoridade Nacional Da Aviação Civil, 2016)

navegação aérea aplicáveis ao tráfego aéreo geral.(Regulamento de Execução (UE) N. o 923/2012 Da Comissão Europeia, 2012)

4.3.3.3 Decreto-Lei n.º 58/2018

O Decreto-Lei n.º 58/2018, de 23 de julho de 2018, pretende estabelecer um regime de carácter obrigatório de registo e seguro de responsabilidade civil a operadores de UAS em espaço aéreo nacional.

Segundo este Decreto-Lei, é obrigatória a contratualização de seguros de responsabilidade civil caso o MTOM do UAS seja igual ou superior a 900 g. Em relação ao registo de operadores de UAS, na plataforma oficial da ANAC, este Decreto-Lei executa o artigo 14º do Regulamento de Execução (UE) n.º 947/2019, que estabelece que devem ser registados operadores que operem na categoria específica, independentemente da massa; os operadores que operem na categoria aberta devem ser registados se o UAS tiver uma MTOM igual ou superior a 250 g, ou equipada com qualquer tipo de sensor capaz de capturar dados pessoais (áudio, vídeo, entre outros) (Comissão Europeia, 2019b).(Decreto-Lei n.º58/2018 de 23 de Julho Da Assembleia Da República, 2018)

4.3.3.4 Código Penal Português (Decreto-Lei n.º 48/95)

A captação de imagens sem consentimento de pessoas constitui crime de acordo com o Código Penal Português, sobre o abrigo do Decreto-Lei 48/95. Visto que a utilização de UAS pode, ou não, implicar a captação de imagens e/ou vídeos, torna-se pertinente o cumprimento e conhecimento destes mesmos artigos.(Decreto-Lei n.º 48/95 Do Ministério Da Justiça, 1995)

4.3.3.4.1 Artigo 192.º - Devassa da vida privada

Presente no Capítulo VII, referente a crimes contra a reserva da vida privada, o artigo 192.º constitui como crime a captação, filmagens, registo, observação, escuta ou divulgação, de factos ou imagens, de pessoas, ou espaços íntimos sem consentimento e com intenção de devassar a vida privada das pessoas.

4.3.3.4.2 Artigo 199.º - Gravações e fotografias ilícitas

Presente no Capítulo VIII, referente a crimes contra outros bens jurídicos pessoais, este artigo constitui como crime a gravação, uso e permissão de palavras proferidas por outra pessoa, sem seu consentimento e não destinadas ao público, e a captação, filmagem, uso ou autorização de imagens de outra pessoa sem o seu consentimento.

5. Sistemas de posicionamento

Os sistemas de posicionamento são indispensáveis para o piloto automático dos UAS. Uns são equipados com um sistema GNSS/IMU, como é o caso do *DJI Phantom 4 Pro*, e outros, para além do sistema GNSS/IMU, são capazes de utilizar uma, ou várias estações base RTK para melhorar o posicionamento por GNSS/IMU em tempo real, como é o caso do *DJI Matrice 210 RTK*. Neste capítulo será dada relevância aos PF pela sua importância para o apoio aos processos fotogramétricos. Neste projeto a coordenação dos PF no terreno foi feita com recurso a técnicas de posicionamento GNSS.

5.1 Pontos fotogramétricos

Na secção 5 os PF foram referidos como importantes elementos para qualquer processo fotogramétrico. Para estes pontos são determinadas as suas coordenadas que servem de apoio à aerotriangulação.

A marcação destes pontos tem de ser feita antes de efetuar o levantamento aerofotográfico. Estes pontos podem ser sinalizados pelo topógrafo através de marcas ou utilizando elementos naturais, ou seja, elementos presentes na paisagem – esquinas de passeios, cantos de passadeiras para peões – e devem estar bem distribuídos pela área a levantar e ser visíveis em várias fotografias. A utilização de PF sinalizados permite uma melhor correspondência entre o ponto imagem e o ponto objeto o que é essencial para a determinação correta da orientação externa da fotografia e a orientação absoluta do modelo estereoscópico.

A coordenação altimétrica e planimétrica dos PF é feita através de técnicas topográficas ou espaciais apropriadas à precisão que se pretende alcançar, variando estas técnicas em função da escala do produto final (Lourenço, 2017).

Quanto ao número de PF a coordenar, este não é exato nem linear. A quantidade de PF a levantar irá depender da morfologia do terreno, como por exemplo se existem ou não variações de terreno, da escala do levantamento fotográfico, da área e da finalidade do trabalho. No entanto, teoricamente a orientação de um par estereoscópico necessita apenas de três pontos não colineares e visíveis nas duas fotografias em simultâneo para se ser capaz de realizar uma ligação entre o modelo estéreo e o terreno. Quando se utilizam vários modelos estereoscópicos formando um bloco, a quantidade de PF necessária diminui, mas é necessário ter atenção à sua distribuição espacial.

De acordo com Redweik (2019), para a marcação dos PF, caso estes não sejam naturais, é necessário ter em conta aspetos como a localização das marcas, a forma, a dimensão o material e a cor das mesmas.

5.1.1 Características dos PF

Na definição da localização dos PF é necessário seguir alguns procedimentos básicos. A marcação destes pontos tem de ser feita em terreno horizontal, ter boa visibilidade para cima e estar longe de objetos altos e ser identificável no maior número de fotografias possível (Redweik, 2019). Para levantamentos fotográficos feitos com UAS é aconselhável marcar PF em cada canto do bloco, um no meio e distribuir os restantes pontos de maneira a que todo o bloco fique com uma marcação bem distribuída.

Aquando do planeamento do levantamento dos PF, Lourenço (2017), chama a atenção a imprevistos e condicionantes que podem acontecer na deslocação a campo para a marcação dos PF, bem como, na altura de realizar o levantamento aerofotográfico. Em relação à marcação dos PF, é preciso ter a noção se o local é acessível por via pública e se não está em propriedade privada, se o planeamento dos pontos for feito através de imagens disponibilizadas pelo *Google Earth*, é preciso ter em atenção a data das imagens que estamos a observar. Se estivermos a marcar os pontos sobre imagens antigas podemos cair no erro de marcar um ponto num local que já não existe, ou que se encontra inacessível (Figura 5.1). Por fim, existem outros dois constrangimentos que devemos considerar, caso se utilizem marcas artificiais: é preciso ter a noção de que a curiosidade da população pode causar o desvio da marca. Se assim acontecer, o ponto não deve ser considerado. O outro constrangimento tem a ver com o comportamento da população em relação à marcação de pontos perto do seu local de residência. Aconselha-se que o coordenador dos pontos tenha sempre consigo toda a documentação necessária para comprovar a legalidade do levantamento de PF, e na interação com a população, deve manter uma postura calma e tirar todas as dúvidas à população de forma a não gerar conflitos. O tempo de levantamento de PF é um trabalho moroso e todo o tempo é essencial. Em último caso deverá chamar-se as autoridades locais de forma a poder continuar com o levantamento. Durante o levantamento fotográfico os constrangimentos que podem existir são essencialmente o desvio de marcas artificiais, referido supra, a ocultação de marcas devido a passagem ou estacionamento de carros e peões, a

destruição de marcas por algum residente que não tenha conhecimento do levantamento aerofotográfico e de PF.



Figura 5.1 – Janela temporal. a) 10/08/2018; b) 04/09/2019.
[Google Earth, 2021]

A dimensão dos PF deve ter em conta a escala da cobertura aerofotográfica, pois esta irá determinar a altitude de voo bem como o tamanho de um pixel no terreno – *Ground Sampling Distance* (GSD). Redweik (2019), aconselha a tornar d (diâmetro da marca central) (Figura 5.2) igual a um múltiplo ímpar da dimensão do GSD – de 3 a 5 vezes esse mesmo valor. As figuras seguintes sugerem as restantes dimensões para os elementos da marca tendo em conta a resolução da imagem (Figura 5.2) e a escala da fotografia (Figura 5.3). Para além da resolução e escala da imagem, a dimensão da marca deve considerar também o contraste local, a luminosidade e as condições atmosféricas na altura do voo (Redweik, 2019).

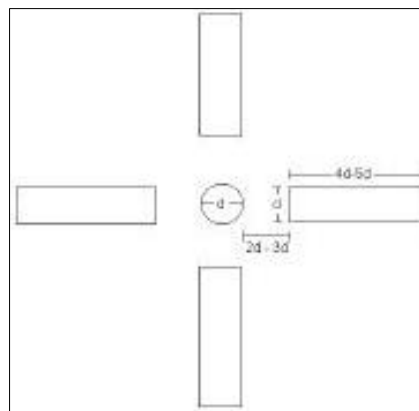


Figura 5.2 – Dimensões para PF.
[Redweik, 2019]

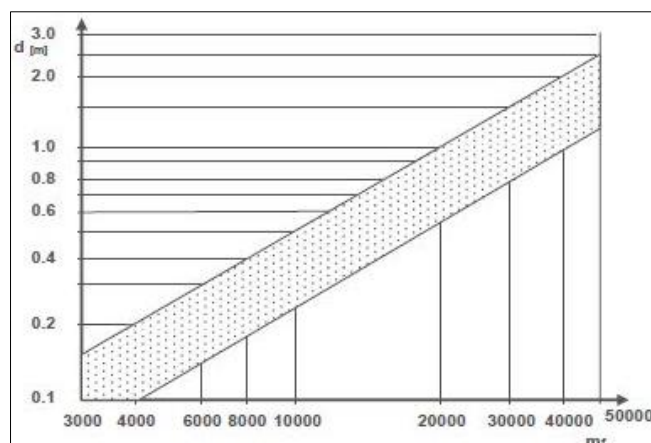


Figura 5.3 – Gráfico de d em função da escala da foto.
[Redweik, 2019]

Em relação ao material usado para as marcas, estas podem ser pintadas ou telas de plástico no chão (Figura 5.4).

É desejável que as marcas sejam o mais permanentes possível, no caso das marcas pintadas no chão, devem ter uma tinta que seja resistente a chuva nos períodos posteriores à sua marcação. Em relação às marcas de plástico têm de ser pesadas o suficiente para resistir a rajadas de vento para não voarem do sítio. No entanto, se o levantamento for em zonas urbanas é necessário que a tinta das marcas seja de curta durabilidade para não ser confundida com sinalização de trânsito horizontal.

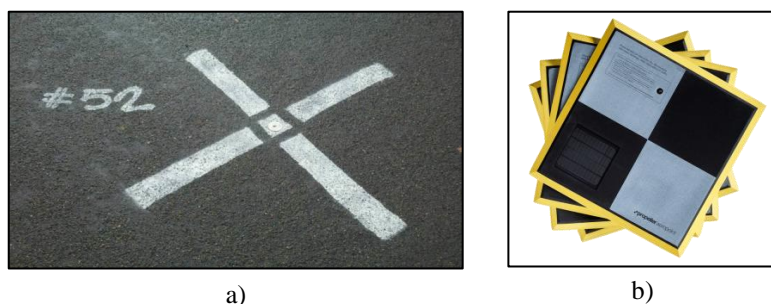


Figura 5.4 – Exemplos de PF. a) Pintado; b) Tela de plástico.
[DroneDeploy, 2019; Rise Above, 2019]

Quanto à cor das marcas, é aconselhável utilizar cores que se distingam facilmente da vizinhança. Cores brancas podem sofrer com a radiação solar e cores pretas são pouco visíveis. Cores como o azul, vermelho e amarelo são boas opções. No caso das marcas de plástico, é bastante usual utilizar-se marcas com cores a preto e branco como se pode ver na Figura 5.4 b).

5.1.2 Registo dos PF

No momento de determinar as coordenadas dos PF é necessário preencher uma ficha (disponível no Anexo V) para cada ponto coordenado. Nessa ficha deve constar o nome da entidade, a designação do ponto, as coordenadas correspondentes, a morada em que está marcado, uma breve descrição do ponto coordenado, para que possa ser confirmado, ou reutilizado, a data da coordenação e, por fim, fotografias da coordenação do ponto e a sua localização num mapa.

6. Enquadramento geográfico da área de estudo

A área de estudo está localizada no litoral oeste de Portugal, no concelho de Torres Vedras e freguesia de Silveira. O concelho está limitado a Norte pelo concelho da Lourinhã, a nordeste pelo Cadaval, a este por Alenquer e a sul pelos concelhos de Sobral de Monte Agraço e Mafra. Este concelho

tem uma área de 407,15 km² e, de acordo com os Censos 2011 (INE, 2011), conta com mais de 79 000 habitantes. Torres Vedras está atualmente – desde 28 de março de 2013 – subdividido em treze freguesias – Maceira, Campelos, Carvoeira, Runa, Freiria, Maxial, Ponte do Rol, Ramalhal, São Pedro da Cadeira, Matacães, Silveira, Turcifal e Ventosa.

É na freguesia de Silveira que está localizado o aeródromo de Santa Cruz – LPSC (Figura 6.1). Este aeródromo tem uma zona limítrofe de 5 milhas náuticas, o equivalente a 9260 m, a partir do seu ponto de referência – 39° 7' 25" N e 9° 22' 48" W – e a sua área de ação é de aproximadamente 269,5 km².

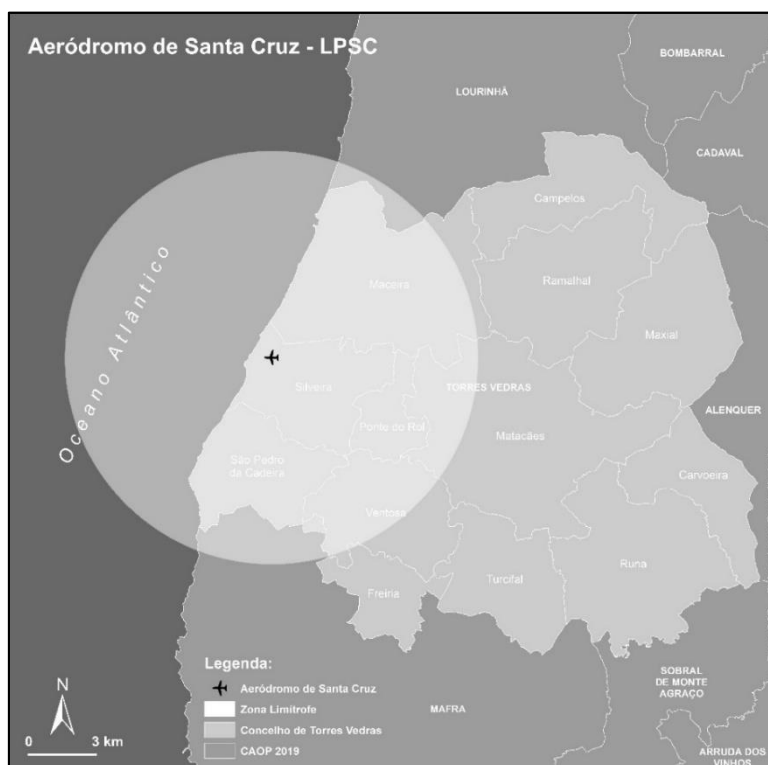


Figura 6.1 – Localização do aeródromo de Santa Cruz – LPSC.

7. Software para o plano de voo

Para a realização de um levantamento fotográfico é sempre necessária a elaboração de um plano de voo. Esta necessidade levou diversas empresas a desenvolverem *softwares* e aplicações que permitissem o planeamento de uma missão com recurso a UAS.

Nesta secção será analisada a aplicação utilizada para o planeamento de missões com recurso a UAS. A aplicação escolhida para o planeamento dos levantamentos fotográficos foi a *app* da *DroneDeploy*. Esta aplicação permite ao utilizador criar diversos tipos de planos de voo para diferentes finalidades.

Na Tabela 7.1 estão apresentados os pontos fortes e pontos fracos identificados na experimentação desta aplicação.

Tabela 7.1 – Pontos fortes e pontos fracos do *DroneDeploy*.

Pontos fortes	Pontos fracos
<ul style="list-style-type: none"> • Escolha de ambas as sobreposições • Escolha da direção de voo • Guardar planos de voo • Estimativa da missão (tempo, hectares, fotografias e baterias) • Compatibilidade com a aplicação DJI GO • <i>Terrain Awareness</i> • <i>Obstacle Avoidance</i> • Elaborar planos de voo no PC • Imagens <i>Google Maps</i> • Importar ficheiros KML e SHP • Possibilidade de instalação de <i>apps</i> • Possibilidade de selecionar o modelo de UAS a utilizar 	<ul style="list-style-type: none"> • Poucos modos apropriados para projetos fotogramétricos • Ângulo da câmara limitado • Algumas funcionalidades só estão disponíveis para utilizadores com subscrição • Não informa do número limite de fiadas do UAS

A *app DroneDeploy* apresenta uma interface (Figura 7.1) simples, bem organizada e suave à vista do utilizador.

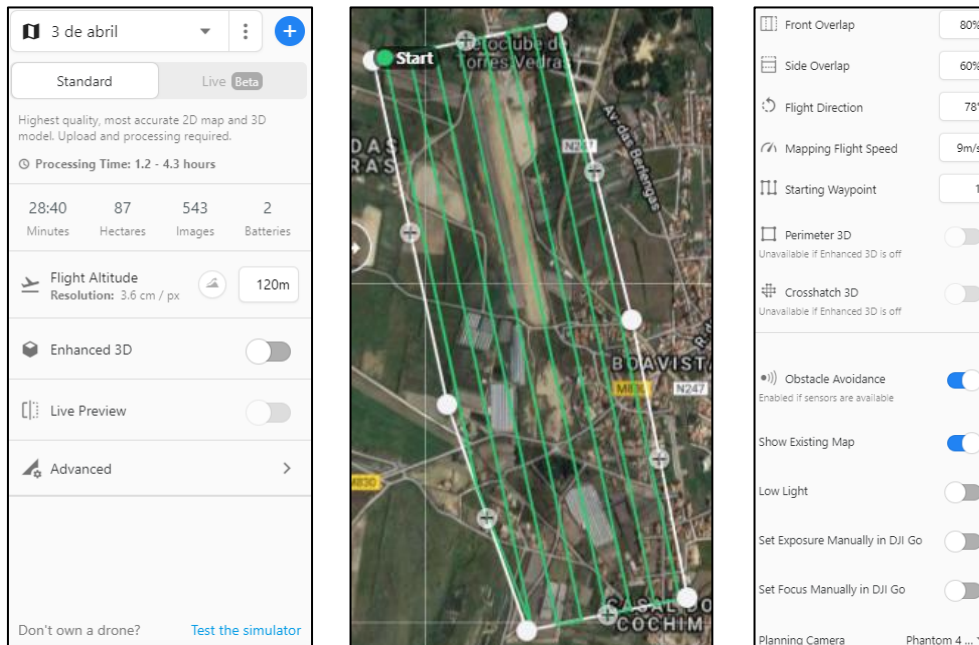


Figura 7.1 – Interface da aplicação *DroneDeploy*.

Esta aplicação utiliza imagens do *Google Maps* como fundo para o planeamento da missão. É possível carregar ficheiros *shapefile* (.shp) e *KML* (.kml) com um polígono já desenhado para ser utilizado como a área de projeto, isto torna a experiência mais agradável, *user friendly* e multi-plataforma. Após o desenho, ou importação, da área de projeto o utilizador pode utilizar parâmetros de voo automáticos (baseados em milhares de planos de voo semelhantes por outros utilizadores), ou

preencher os parâmetros manualmente – altitude, sobreposições, direção de voo e velocidade. A possibilidade de selecionar o UAS (não disponível na altura em que se realizou a missão) que será utilizado para a missão permite o cálculo, em tempo real enquanto se preenche os parâmetros do plano de voo, do tempo estimado de voo, a área total (em ha), o número de fotografias que serão tiradas, bem como o número de baterias estimadas para a missão – aspeto bastante útil para o operador e piloto remoto do UAS. Esta aplicação tem também uma funcionalidade chamada *Terrain Awareness*, que recorrendo a dados da NASA e da *Mapbox*, é capaz de variar a altitude de acordo com as variações de terreno, sendo capaz de eliminar as diferenças de escala, no entanto, esta ferramenta só está disponível a planos até aos 80 ha de área. Outra funcionalidade importante é a capacidade de utilizar os sensores do UAS para evitar obstáculos (*Obstacle Avoidance*), garantindo uma missão mais segura.

Outro ponto forte no uso desta aplicação vem no sentido da sua compatibilidade com a aplicação da DJI – DJI GO – útil para utilizadores experientes. Esta compatibilidade permite definir parâmetros como a exposição e foco da câmara na DJI GO e serem identificados pela *DroneDeploy*. Para além da compatibilidade com a DJI GO, é possível também instalar *apps*, dentro da aplicação, que melhorem a experiência de utilização e/ou ajudem no planeamento do voo, processamento, ou produção de produtos.

Os pontos fracos desta aplicação estão relacionados apenas com limitações de subscrições e *hardware*, por exemplo, não é possível escolher o ângulo do eixo fotográfico da câmara, que por defeito está na sua posição vertical. O ângulo da câmara só é mudado se forem ativadas as funcionalidades *Enhanced 3D*, *Perimeter 3D* e *Crosshatch 3D*.

8. Metodologia

Nesta secção serão apresentados e explicados os *workflows* seguidos para a realização deste projeto, o plano de voo idealizado para a obtenção das fotografias aéreas e a metodologia utilizada para o controlo de qualidade.

8.1 Faseamento do trabalho

Todo o estudo científico percorre um conjunto de fases, processos e tarefas para chegar aos resultados propostos. Desta forma, no Anexo II está presente o esquema referente ao faseamento do trabalho que será seguido ao longo deste estudo.

O projeto começa pela pesquisa bibliográfica acerca do estado da arte do que se vai estudar – nomeadamente a temática dos UAS e Fotogrametria – e de metodologias adotadas para estudos semelhantes, *software* disponível, marca e modelo do UAS, que melhor responde às necessidades do projeto, e manuseamento do *software* e UAS – como descrito nas secções 1.3 e 2. Este processo de pesquisa pode ser feito ao longo de todo o projeto, de acordo com as necessidades sentidas.

O passo seguinte foi a escolha do local a realizar o levantamento fotográfico e a definição do Nível de Detalhe (NdD) a que se destina o levantamento aerofotográfico e os produtos resultantes a partir deste, por parte dos orientadores. Este NdD, adotado nas normas da DGT, de 2020, e inspiradas nas normativas europeias INSPIRE¹⁴, veio a substituir a noção de escala do mapa (Redweik, 2020). Neste novo formato, o NdD define “um catálogo de objetos a restituir e respetivos atributos, como também estipula as precisões geométricas exigidas, a consistência com o catálogo e a completude” (Redweik, 2020). Este NdD também indica a obrigatoriedade, ou não, da representação de um objeto e a sua geometria.

¹⁴ “A diretiva INSPIRE visa a criação de uma infraestrutura de dados espaciais da EU para efeitos das políticas ambientais da EU, políticas ou atividades que possam ter impacto no ambiente.” (INSPIRE, 2021).

Visto que o voo se realizou no dia 3 de abril de 2020, período em que estava em vigor o primeiro estado de emergência devido à pandemia do SARS-CoV-2, foi necessária a requisição de autorizações para a circulação entre concelhos – após contacto com a Guarda Nacional Republicana (GNR) requerida pela empresa que acolheu a orientação externa da dissertação, a *The Use Concept, Lda.* – e a autorização ao diretor do Aeródromo de Santa Cruz (LPSC) para realizar um levantamento aerofotográfico na área afeta ao aeródromo, tendo em conta as restrições locais, até à altitude máxima de 120 metros.

Após a definição do local a fotografar e do NdD pretendido – no caso presente o Nível de Detalhe 1 (NdD1) – procedeu-se ao planeamento do voo em ambiente *DroneDeploy*, a partir de um telemóvel, e a idealização do posicionamento dos PF a marcar no terreno – apresentado na secção 8.2.1.

Com todo o trabalho de gabinete concluído, esperou-se até ao dia 3 de abril para a realização do voo. Na chegada ao local, foi necessária a avaliação do estado do tempo, para saber se a missão podia decorrer em segurança, pois se o estado do tempo não permitisse a realização de um voo seguro, seria necessário voltar mais tarde, ou até mesmo, noutro dia. Passada esta fase, chegou a altura de marcar os PF no terreno por meio de marcas no chão e a sua coordenação com recurso a técnicas de posicionamento preciso com GPS.

Com a marcação e coordenação dos PF concluída, o próximo passo consistia na preparação para o levantamento aerofotográfico, que incluiu a montagem dos componentes do UAS e a escolha da base de descolagem e aterragem.

Com o levantamento aerofotográfico concluído, foi possível obter os primeiros resultados no *software Pix4D Mapper*, nomeadamente a ortofoto, os MDE, a *3D Mesh* e as curvas de nível. O processamento inicial das fotografias, no *Pix4D*, permitiu a obtenção das OI e OE das fotografias que foram utilizadas posteriormente para a criação dos modelos estereoscópicos utilizados para fazer a estereorrestituição. A estereorrestituição foi feita em ambiente *Photomod 5 Lite*.

O próximo passo foi a uniformização dos dados em ambiente *ArcGIS*, utilizando o *ArcMap 10.7.1* da ESRI¹⁵. Neste processo foi feita uma revisão das tabelas de atributos de todos os objetos desenhados, foi validada a topologia desses mesmos objetos, como descrito na secção 8.5, de forma a garantir que todas as entidades partilham o mesmo espaço geográfico de acordo com as regras estabelecidas, e criadas as relações entre as classes.

Depois de obtidos e tratados todos os produtos geográficos passou-se a uma das fases mais importantes de todo o projeto, o controlo de qualidade. Este controlo de qualidade teve como objetivo verificar a completude – verificar a comissão ou omissão de dados – a sua consistência – conceptual, de domínio, de formatos e topológica – e a sua exatidão – absoluta e temática. Caso existissem erros, dever-se-ia corrigir esses erros e realizar um novo controlo de qualidade.

No final do controlo de qualidade foi o momento de analisar todos os resultados.

8.2 Voo e apoio topográfico: Execução

Nesta secção serão abordadas questões relativas à preparação para a realização dos voos, todo o equipamento que será utilizado nos levantamentos fotográficos, a apresentação do plano de voo, o GSD espectável atingir no levantamento aerofotográfico e a localização dos PF no terreno.

A realização de um levantamento fotográfico, ou qualquer outra missão com recurso a UAS, tem um conjunto de procedimentos associados ao mesmo, desde a elaboração do plano de voo, à

¹⁵ Empresa norte-americana, fundada em 1969, líder no mercado dos SIG.

representada a localização de todos os PF no terreno. Foram levantados um total de 20 PF – pontos no chão – sendo 11 pontos fotogramétricos e 9 pontos de verificação.

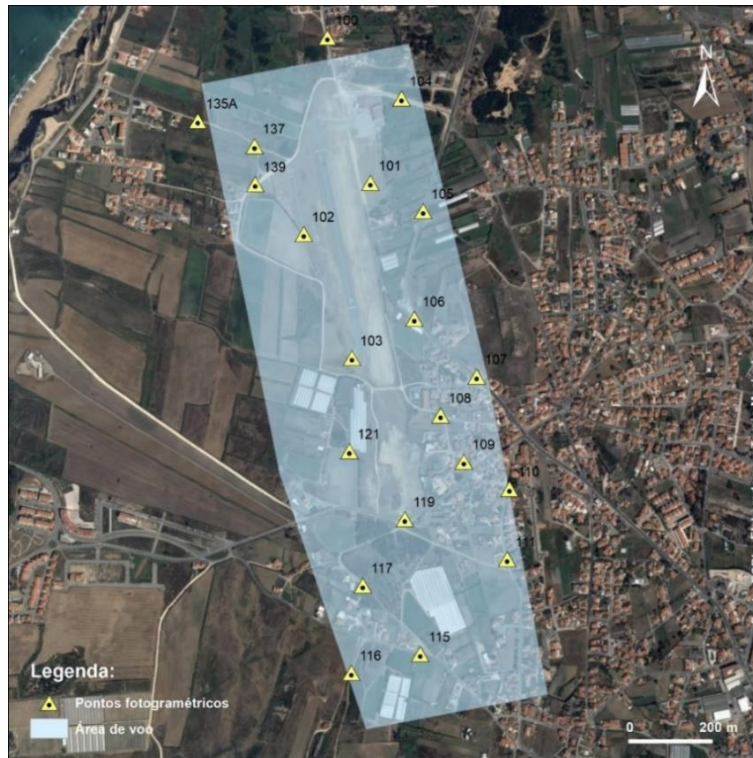


Figura 8.2 – Localização dos PF

É de referir que estava prevista a realização de um levantamento fotográfico para uma altitude de 160 metros AGL, no entanto, devido à grande área de voo, a existência de aglomerados populacionais, a existência do Aeródromo de Santa Cruz, a morosidade do processo de autorização da ANAC e o próprio facto do voo ser considerado de operação específica – abordado na secção 4.1.2 – optou-se por se realizar apenas o levantamento aerofotográfico a 120 m.

8.2.2 Marcação e coordenação dos PF

Conhecida a localização idealizada para os PF, a sua marcação e coordenação das suas coordenadas X, Y e Z, foram feitas pelo mestrando e um técnico da equipa da empresa *The Use Concept*. A marcação dos pontos foi feita com recurso a desenho no terreno. As coordenadas foram registadas no sistema de referência nacional – PT-TM06/ETRS89 – com recurso ao receptor *GPS Trimble R8* com uma precisão de 2 cm (± 0.02 m).

Na altura da marcação e coordenação dos PF, foram tiradas fotografias aos pontos e feitas fichas de registo para cada PF (presente no Anexo V). Como referido na secção 5.1.2, cada ficha contém a designação do ponto, as coordenadas M, P e a Cota do ponto, a morada da rua em que está situado, uma breve descrição e a data de marcação, incluindo também capturas de ecrã da localização do ponto (no *Google Earth* e *Google Maps*) e uma fotografia do ponto no local onde foi coordenado.

8.2.3 Equipamento

Para a realização dos testes e levantamentos fotográficos foram utilizados um conjunto de equipamentos descritos na Tabela 8.2, respetivamente.

Tabela 8.1 – Equipamento utilizado

Equipamento	Marca	Quantidade
Drone:	DJI Phantom 4 Pro V1	1
Controlo Remoto:	DJI	1
Dispositivo móvel:	Xiaomi Mi 9	1
Recetor GPS:	Trimble R8	1
Baterias:	DJI	6
Hélices:	DJI	4
Cartão de Memória:	Kingston Micro-SD 16 GB	1
Cabos:	USB Type-C	2
Latas de tinta (400ml):	-	3

A duração total dos levantamentos foi aproximadamente de 1h, foram utilizadas duas baterias e contabilizou-se um total de 1030 fotografias. Depois de aferir a qualidade das fotografias, foram seleccionadas 732 fotografias.

8.3 Workflow do Pix4D

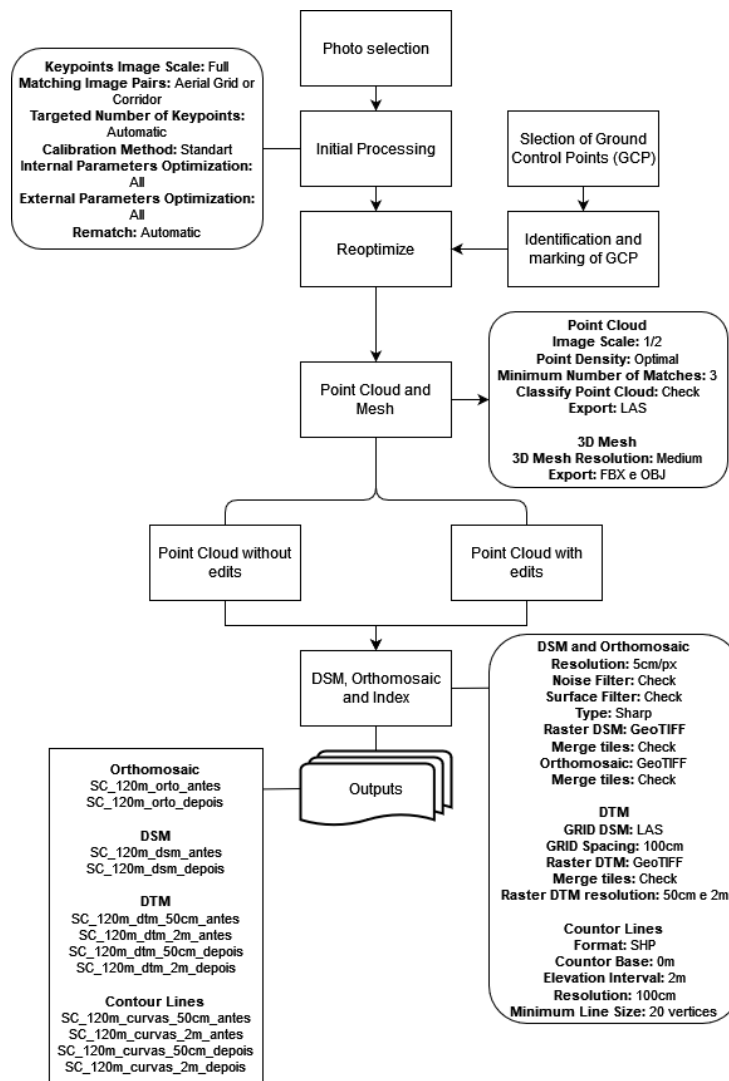


Figura 8.3 – Workflow do processo no Pix4D Mapper e os parâmetros utilizados.

Para a obtenção de produtos como nuvem de pontos, MDS, MDT, curvas de nível e ortofotomosaicos, foi utilizado o *software* do *Pix4D Mapper*. A obtenção destes produtos respeitou um conjunto de passos e decisões tomadas (Figura 8.3) ao longo de todo o processo.

Após a obtenção das fotografias aéreas é necessário selecionar as que se pretendem utilizar para o projeto e realizar o *Initial Processing*, que tem como objetivo detetar os pontos conspícuos das fotografias e encontrar correspondências entre eles no âmbito de uma aerotriangulação automática (AAT), através de operadores SIFT, e calcular a OI e OE de todas as fotografias por ajustamento em bloco por feixes perspetivos (BBA). Após este primeiro processamento foram adicionados os PF e respetivas coordenadas medidas no terreno, definido o seu tipo – *3D point* ou *check-point* – e identificados nas fotografias, como mostra a Figura 8.4. A diferença entre estes dois tipos de ponto é que os *3D point*, ou pontos de controlo, são utilizados para a aerotriangulação, enquanto que os *check-points*, ou pontos de verificação, servem para avaliar a qualidade dos resultados da AT e a qualidade posicional dos produtos gerados.

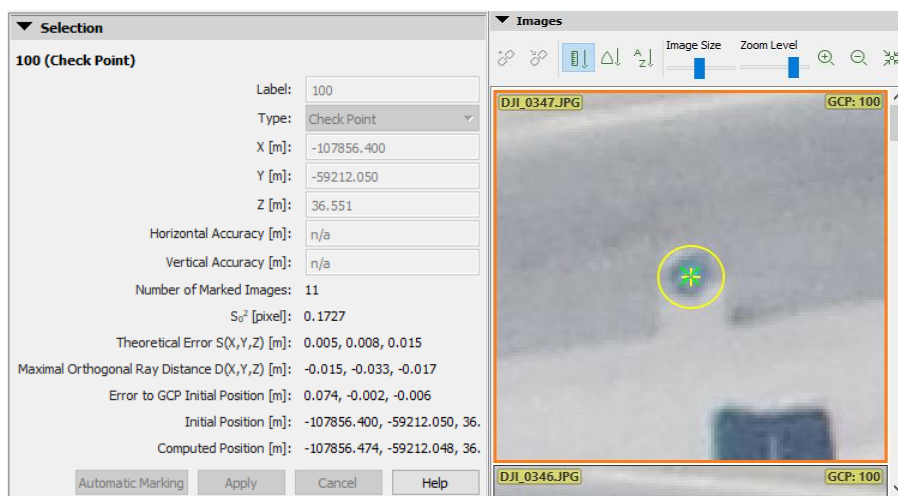


Figura 8.4 – Identificação de um PF numa fotografia.

Depois de identificados todos os pontos de controlo (*3D points*) e de verificação (*check-points*), foi necessário realizar uma reoptimização do projeto. A reoptimização do projeto permite ao *software* melhorar os parâmetros internos da câmara e a orientação externa das fotografias melhorando a precisão dos resultados do restante projeto.

Concluída esta fase inicial, passamos à fase da obtenção da nuvem de pontos – *Point Cloud and Mesh* – necessária para a geração dos MDE, curvas de nível e ortofotomapas.

Para a nuvem de pontos foram escolhidos os parâmetros presentes na Figura 8.5.

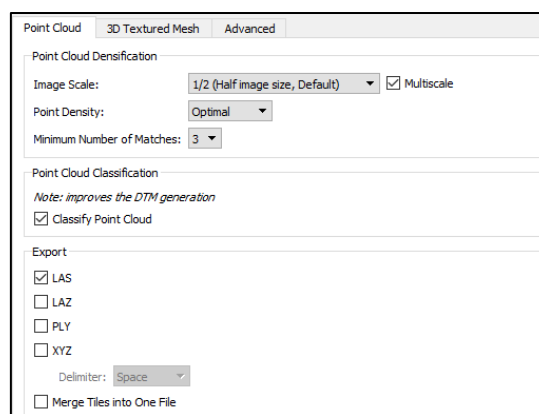


Figura 8.5 – Parâmetros para a nuvem de pontos.

No que toca à *Image Scale*, foi utilizada a opção de 1/2. Nesta opção são utilizadas imagens com metade do seu tamanho original para computação e determinação de pontos 3D adicionais na nuvem de pontos densa. As imagens são obtidas por *resampling* das originais. Segundo o manual do *Pix4D*, esta a escala é eficaz em todo o tipo de projetos. As escalas abaixo (1/4 ou 1/8) são normalmente aconselhadas para projetos com vegetação, onde são calculados menos pontos 3D adicionais do que à escala 1/2. A escala 1 utiliza o tamanho original das fotografias para a computação de pontos 3D adicionais, nesta escala são computados mais pontos em áreas de fácil correspondência, como cidades, áreas rochosas, etc., sendo mais aconselhável para projetos com preponderância no meio urbano. A nível de processamento, quanto maior for a escala, maior será a utilização dos componentes da máquina em que se está a trabalhar – um projeto realizado na escala 1 pode utilizar até 4 vezes mais memória RAM¹⁷, GPU¹⁸ e tempo que um projeto realizado à escala 1/2. Neste parâmetro também foi ativada a opção “*Multiscale*”, esta opção tem como objetivo calcular pontos 3D adicionais em diferentes escalas, por exemplo, escolhida a escala 1/2 de imagem, pontos serão calculados primeiro na escala 1/2, seguidamente 1/4 e por fim 1/8 de imagem. Esta opção permite ter uma densidade de pontos maior na nuvem.

Quanto à densidade dos pontos, foi decidido manter também a opção selecionada por defeito, que também é aconselhada pela *Pix4D*, *Optimal*. Esta opção calcula pontos 3D a cada $4/(Image\ Scale)$ pixels, ou seja, para a escala 1/2: $4/0.5 = 8$ pixels. Assim será calculado um ponto 3D a cada 8 pixels da imagem original. Quanto mais baixa a escala, a densidade de pontos será mais baixa e o processamento mais rápido, quanto mais alta, maior a densidade de pontos, maior tempo de processamento e os resultados não melhoram significativamente. A opção *optimal* garante bons resultados e um tempo de processamento razoável.

Em relação ao número mínimo de correspondências, este parâmetro representa o número mínimo de reprojeções válidas de um ponto 3D nas fotografias. Aqui, quanto maior o número de correspondências, mais precisos serão os pontos considerados, sendo necessário para um número de correspondências mais altas uma sobreposição maior e o recurso a voos oblíquos. Por sua vez, quanto menor o número de correspondências, mais pontos 3D serão calculados, mas existe uma maior probabilidade de existência de ruído, ou seja, pontos 3D mal calculados. Visto que o voo foi feito apenas em posição vertical, com sobreposições de 80% longitudinal e 60% lateral, optou-se por utilizar pontos com pelo menos 3 correspondências. Apesar da possibilidade de existência de ruído, serão calculados mais pontos 3D.

Por fim, foi também selecionada a opção de classificação da nuvem de pontos, que ajudará à geração dos MDE. Esta classificação será útil para futuras edições na classificação da nuvem de pontos que serão referidas mais à frente.

Nesta fase resta apenas a geração da *3D Mesh* (Figura 8.6), que tem como objetivo transformar uma nuvem de pontos numa superfície 2.5D através da triangulação dos pontos presentes na nuvem. Optou-se por utilizar uma resolução média para evitar grandes tempos de processamento – em alta resolução só o processamento da *3D Mesh* para este projeto podia demorar mais de 8 horas – e as diferenças dos resultados entre resolução alta e média não são significantes.

¹⁷ *Random-Access Memory*.

¹⁸ *Graphics Processing Unit*.

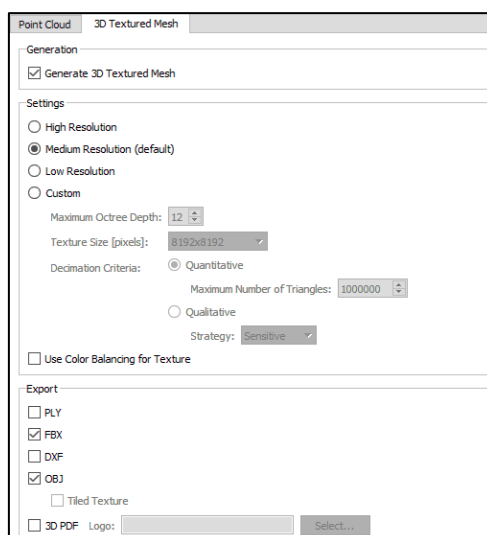


Figura 8.6 – Configuração dos parâmetros para a 3D Mesh.

Após esta fase, passámos à análise da nuvem de pontos densificada. Este momento é importante para se perceber se a classificação dos pontos foi bem feita pelos classificadores automáticos, por exemplo, se existem pontos mal computados (ruído) e/ou se é necessária a correção de alguma superfície.

A edição da classificação da nuvem de pontos densificada é muito importante para a geração de produtos como MDS, MDT, ortofotomapas e curvas de nível. A classificação da nuvem é baseada em 5 classes – *Ground*, *Road Surface*, *High Vegetation*, *Buildings* e *Human Made Object* – e os pontos são atribuídos a essas classes pela sua cor e geometria da vizinhança.

Começando pela edição da nuvem de pontos densificada, baseada na reclassificação, notou-se que existiam confusões entre as classes de *High Vegetation* e *Ground*, por exemplo, em situações onde existissem arbustos, árvores ou outro elemento acima do solo com uma cor semelhante às ervas (Figura 8.7). Nestes casos o *software* por vezes identificava esses pontos como *Ground*, sendo necessária a sua correção em todas as ocorrências. A correção é feita pela seleção dos pontos e consequente alteração da classe no menu “*Point Cloud Editing*”.



Figura 8.7 – Demonstração de confusões entre classes (1). Os pontos a vermelho representam aqueles que foram classificados como *Ground* e pertencem à classe *High Vegetation*.

Noutras situações ocorriam erros de classificação entre as classes *Human Made Objects*, *Buildings* e *Road Surface*. Como objetos criados pelo homem assumem-se estufas, armazéns, poços, entre outros. Assim, notou-se alguns erros de classificação em estufas, armazéns e terra batida, como se pode ver na Figura 8.8. Os erros em terra batida não foram corrigidos (erros em que a confusão seja entre as classes *Ground* e *Road Surface*) pois não influenciam a geração do MDT e das curvas de nível,

dado a geração do MDT considerar as classes ao nível do solo, onde estão inseridas as classes *Ground* e *Road Surface*. A correção de elementos acima do solo nestas classes é, sim, importante, pois pode gerar erros no MDT e curvas de nível.



Figura 8.8 – Demonstração de confusões entre classes (2). Os pontos a vermelho representam aqueles que foram classificados como *Building* e/ou *Road Surface* e pertencem à classe *Human Made Object*.

As confusões entre as classes acima descritas foram as mais comuns. Durante todo o processo de reclassificação existiram diferentes confusões que tiveram de ser corrigidas.

As correções ao ruído corrigem-se da mesma maneira, no entanto, a reclassificação é feita para a classe *Disabled*. Esta classe, como o nome indica, não é utilizada para a geração dos produtos geográficos provenientes da nuvem de pontos densificada. Quando se faz alusão a ruído, está-se a referir a pontos que não correspondem à realidade e/ou pontos que não existem. Estes pontos podem acontecer em zonas de sombra, telhados das casas, superfícies curvas, estradas, cabos e/ou postes elétricos, entre outros. O ruído pode ser resolvido de duas formas, a reclassificação para a classe de *Disabled* (Figura 8.9) e/ou criando superfícies (Figura 8.10).



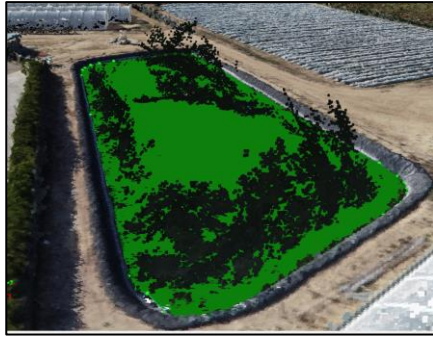
a)



b)

Figura 8.9 – Eliminação do ruído através da reclassificação. a) Ruído existente em locais com sombra; b) Ruído existente em telhados refletivos.

A criação de superfícies serve também para corrigir situações onde faltem pontos. Na Figura 8.10 b) as estufas por vezes apresentavam “buracos” nos seus telhados, causados pela superfície ser muito brilhante quando o sol bate diretamente, sendo então necessário criar superfícies para tornar o telhado uniforme.



a)



b)

Figura 8.10 – Eliminação do ruído através da criação de superfícies. a) Ruído existente num depósito de água; b) Solução para a falta de pontos 3D.

Após a edição da nuvem de pontos, chegou a altura da terceira fase: “*DSM, Orthomosaic and Index*”. Nesta fase é preciso ter especial atenção a parâmetros como a resolução dos MDE, do ortomosaico e os parâmetros relativos às curvas de nível, isto porque todos estes produtos precisam de respeitar as normas da DGT. Nesta fase serão gerados produtos resultantes da nuvem de pontos densificada sem qualquer edição e os mesmos produtos para a nuvem de pontos editada.

Devido à grande resolução espacial possível de obter com fotografias de UAS, todos os produtos geográficos terão as resoluções referentes ao Nível de Detalhe 1 (NdD1). Assim sendo optou-se pelas seguintes resoluções:

Tabela 8.2 – Resoluções dos produtos geográficos de acordo com o NdD1.

Modelo Digital de Superfície	0.05 m
Modelo Digital de Terreno	0.50 m
Modelo Digital de Terreno	2.00 m
Ortofotomapa	0.05 m

Em relação às resoluções do MDS e do ortofotomapa, a resolução espacial das fotografias é de 3.66 cm/px, então arredondou-se este valor para os 5 cm/px. Embora a resolução espacial para o NdD1 seja de 10 cm/px, “nomeadamente em função de finalidades mais específicas para a informação geográfica a produzir, poderão ser consideradas resoluções espaciais de 0.05 m ou 0.25 m para os Ortofotos.” (DGT, 2020).

No que toca aos MDT, optou-se por gerar um MDT que respeite o NdD1 para o tema da Altimetria, que corresponde a 2 m de resolução, respeitando as normas de homologação da DGT, e outro MDT com uma resolução de 50 cm. De acordo com a regra específica RE3.4, “A resolução espacial da grelha do “Modelo digital do terreno” não pode ser inferior a três vezes o EMQ altimétrico do “Modelo digital do terreno”” (DGT, 2020). Assim, gerou-se um MDT com a resolução espacial máxima de 2 m para o NdD1 e, após efetuar o controlo de qualidade e obter o EMQ altimétrico, gerou-se outro com a resolução espacial mínima possível de 50 cm. Os resultados do EMQ para os MDT serão conhecidos na secção 9.4.1.

Para a geração do MDS utilizaram-se dois filtros: o *Noise Filtering* e o *Surface Smoothing*. O *Noise Filtering* tem como função corrigir a altitude dos pontos 3D gerados pelo ruído através da mediana dos pontos vizinhos. Por sua vez o *Surface Smoothing*, que como o nome indica, alisa as superfícies quando elas apresentam irregularidades, tem três modos: o *Sharp*, o *Smooth* e o *Medium*. Optou-se por utilizar o modo *Sharp* que tenta preservar ao máximo a orientação da superfície e manter os cantos e as beiras dos edifícios. Já para o método de interpolação do MDS foi utilizado o IDW. Este método faz a interpolação de valores desconhecidos com o recurso à média ponderada pelos inversos das distâncias

do ponto em causa aos pontos com valores conhecidos, ou seja, quanto mais próximos os pontos estejam entre si, maiores serão os pesos, e o valor interpolado será mais próximo da realidade. O contrário acontece caso os pontos estejam mais afastados entre si.

Por fim, quanto aos parâmetros de geração das curvas de nível, foram estabelecidos os seguintes:

Tabela 8.3 – Parâmetros para as curvas de nível.

<i>Contour Base (m)</i>	0
<i>Elevation Interval (m)</i>	2
<i>Resolution (m)</i>	1
<i>Minimum Line Size (vertices)</i>	20

Começando pelo *Contour Base*, este parâmetro define a elevação a partir da qual as curvas de nível serão geradas tendo sido definida a elevação de 0 metros, a equidistância (*Elevation Interval*) foi definida em 2 metros respeitando o NdD1 das normas de homologação, a resolução foi definida em 1 metro, ou seja cada valor de elevação será registado a cada 1 metro e, por fim o *Minimum Line Size* define o número mínimo de vértices que uma curva de nível pode ter, assim foi definido o mínimo de 20 vértices. No entanto estes parâmetros devem ser adaptados a cada tipologia de terreno.

8.4 Workflow do Photomod 5 Lite

Para a realização da estereorrestituição foi utilizado o *software Photomod 5 Lite*, uma versão gratuita do *software* fotogramétrico *Photomod* da Racurs¹⁹. A utilização deste *software* seguiu um conjunto de passos demonstrados na Figura 8.11.

O primeiro, e óbvio, passo será a criação do projeto. Na criação do projeto foi necessário especificar o tipo de projeto, assim optou-se por selecionar “*Central projection*”, de seguida selecionou-se o sistema de coordenadas a utilizar no projeto, o *Lisbon / Portuguese National Grid*, que corresponde, no *software*, ao sistema de referência nacional PT-TM06/ETRS89, por fim, especificou-se, em “*Relief elevation*” a amplitude aproximada das cotas do terreno e definiu-se um mínimo de 0 metros e um máximo de 99 metros.

¹⁹ Empresa russa, fundada em 1993, especialista em soluções de *software* para processamento de fotografias aéreas, espaciais e terrestres.

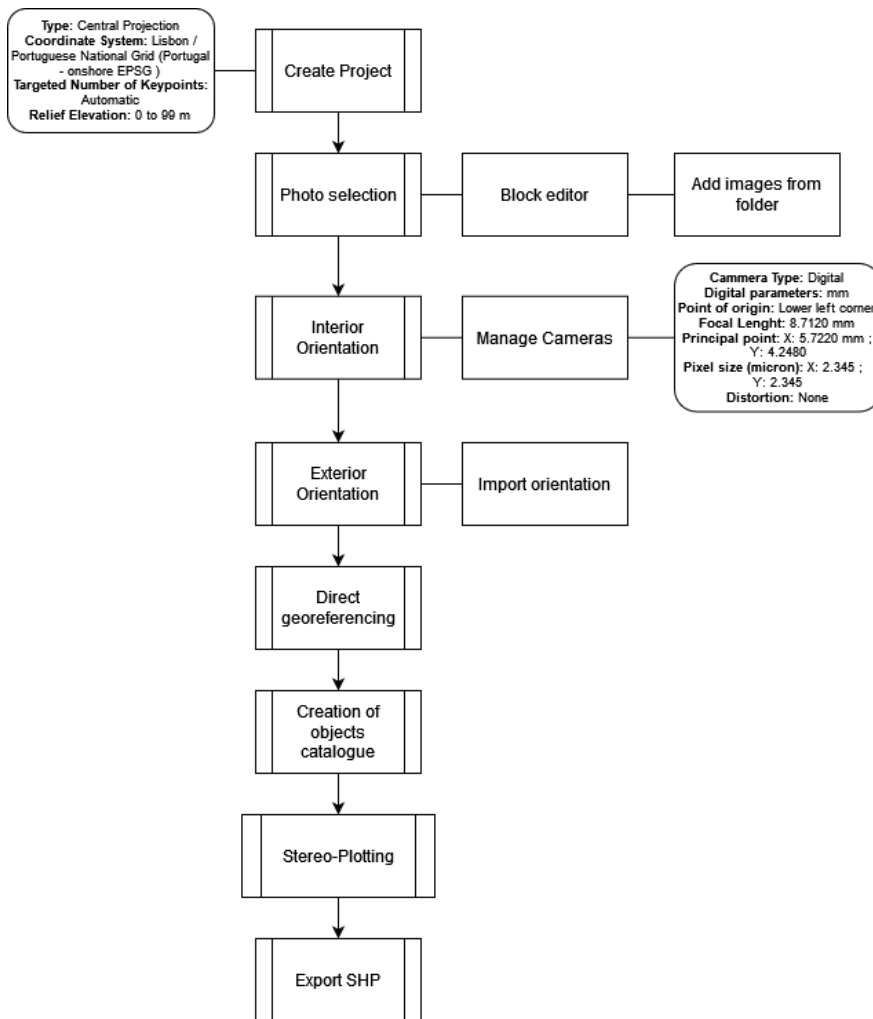


Figura 8.11 – Workflow do processo no *Photomod 5 Lite* e os seus parâmetros.

Após a criação do projeto é necessário selecionar e inserir as fotografias a utilizar no projeto. Como esta versão do *Photomod* é gratuita, existe um limite de 40 fotografias por projeto pelo que foi escolhida uma pequena área que abrangesse o maior número de temas possível.

Depois de inseridas, as fotografias estarão dispostas por fiada como demonstrado na Figura 8.12.



Figura 8.12 – Disposição inicial das fotografias.

O próximo passo será a obtenção das orientações interna e externa das fotografias. Para a obtenção da OI foi necessário adicionar e especificar os parâmetros da câmara fotográfica utilizada no levantamento. Na Figura 8.13 está demonstrada a câmara adicionada para determinar a OI das fotografias.

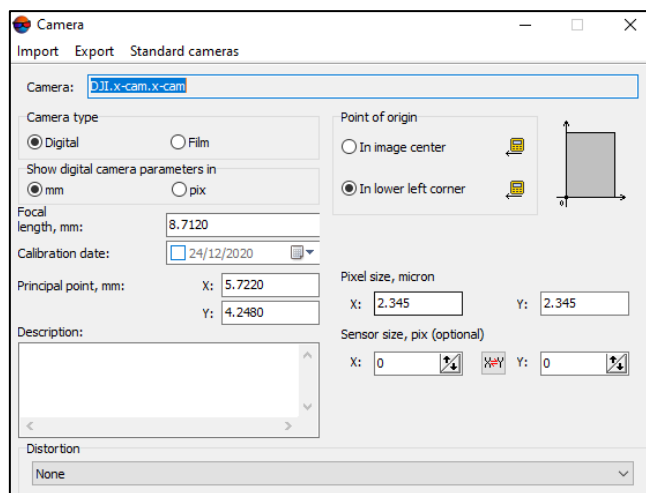


Figura 8.13 – Parâmetros específicos da câmara da DJI.

A determinação da OI realizada pelo *software* está assente em variáveis como o tipo de câmara utilizada para a obtenção das fotografias, a medida em que os parâmetros da câmara estão, o ponto de origem das coordenadas foto, a distância focal da lente utilizada na câmara, as coordenadas do ponto principal no sensor, o tamanho do *pixel*, a dimensão do sensor e o tipo de distorção que a câmara produz na obtenção das fotografias. Desta forma, os parâmetros relativos à distância focal e o ponto principal do sensor e o tamanho do píxel foram retirados do relatório de qualidade obtido pelo *Pix4D Mapper* após o ajustamento dos blocos de imagens, pois estes valores são otimizados em comparação aos valores iniciais (Figura 8.14). Em relação ao ponto de origem das fotografias, foi considerado o canto inferior esquerdo, no entanto, o ajustamento feito pelo *Pix4D* tem em consideração o ponto de origem no canto superior esquerdo, tendo sido necessário realizar cálculos para que os parâmetros calculados para um canto, fossem adequados para o canto oposto e a dimensão do *pixel* foi também calculada à parte.

Initial Values	3666.955 [pixel] 8.600 [mm]	2432.001 [pixel] 5.704 [mm]	1823.999 [pixel] 4.278 [mm]
Optimized Values	3714.715 [pixel] 8.712 [mm]	2439.819 [pixel] 5.722 [mm]	1837.099 [pixel] 4.308 [mm]

Figura 8.14 – Parametros de orientação interna presentes no relatório de qualidade do *Pix4D*, sendo a segunda coluna relativa à distância focal da lente, a terceira o ponto principal em X e a quarta coluna o ponto principal em Y.

Por fim, a distorção foi considerada “None” pois não havia dados de calibração da câmara utilizada no UAS.

No final deste processo de configuração da câmara fotográfica é apenas necessário atribuir esta câmara a todas as fotografias e obter a sua OI.

Obtida a OI das fotografias, o próximo passo será obter os valores de orientação externa das mesmas. Para a orientação externa, o *software* pede os valores relativos a X, Y, Z, *Omega*, *Phi* e *Kappa* de cada fotografia, estes valores podem ser preenchidos pelo utilizador, ou importados de um ficheiro de texto (.txt). Neste caso, os valores de orientação externa de todas as fotografias foram calculados e otimizados pelo *Pix4D Mapper* – como referido no ponto 3.3 – após o processamento inicial, referido na secção 8.3, em formato .txt. Assim procedeu-se à importação desse mesmo ficheiro (Figura 8.15).

imageName	X	Y	Z	Omega	Phi	Kappa			
DJI_0652.JPG	-108138.004291	-59323.071714	191.720489	0.542958	-0.611992	-155.528757			
DJI_0653.JPG	-108133.590947	-59346.782908	191.304280	0.564941	-0.608683	-170.497249			
DJI_0654.JPG	-108128.581079	-59370.896483	190.846270	0.437921	-0.407142	-171.463932			
DJI_0655.JPG	-108123.831106	-59394.359080	190.533077	0.311980	-0.147948	-171.730732			
DJI_0656.JPG	-108119.224757	-59417.344421	190.236516	0.215971	0.069122	-172.202607			
DJI_0657.JPG	-108114.595145	-59440.726680	190.025650	0.111010	0.310061	-172.710900			
DJI_0658.JPG	-108110.122388	-59463.438270	189.832078	0.053906	0.483771	-173.131071			
DJI_0659.JPG	-108105.469751	-59486.798651	189.673122	0.035647	0.627839	-173.588672			
DJI_0660.JPG	-108100.851201	-59510.112927	189.584607	0.000528	0.708622	-173.958014			
DJI_0661.JPG	-108096.304061	-59532.886583	189.411766	-0.011551	0.793394	-174.367984			

Figura 8.15 – Organização do ficheiro criado pelo Pix4D.

Para terminar esta fase de orientação e posicionamento das fotografias, é apenas necessário realizar uma georreferenciação direta das fotografias e o aspeto do ambiente de trabalho será semelhante ao demonstrado na Figura 8.16.

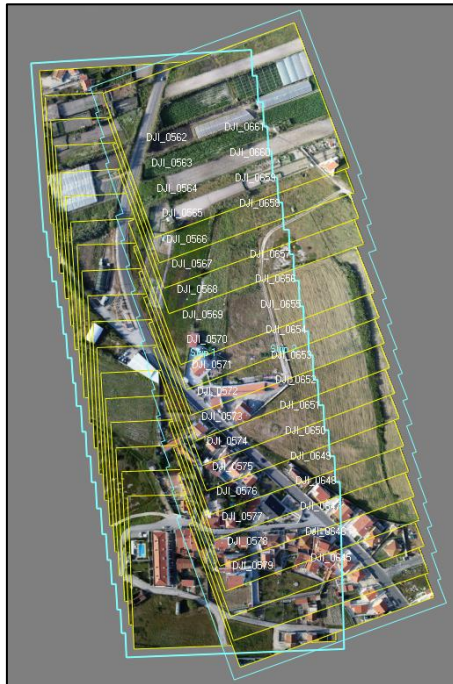


Figura 8.16 – Ambiente de trabalho após a georreferenciação direta das fotografias.

Concluída esta etapa, chegamos à etapa da criação do catálogo de objetos para a estereorrestituição para o Ndd1. Ao contrário do catálogo de objetos para a cartografia 1:10 000, atualmente obsoleto devido às novas “Normas e especificações técnicas para a cartografia topográfica vectorial e de imagem” (DGT, 2020), o catálogo não está organizado apenas por temas e objetos pertencentes a esses temas. Nas novas normas os objetos estão organizados por temas, seguido da classe dos objetos que inclui o código da sua classe, bem como todos os seus atributos inerentes. A estrutura da base de dados cartográfica deve apresentar-se como demonstrado na Figura 8.17 e na Figura 8.18.

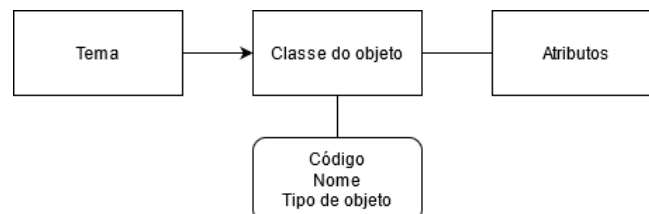
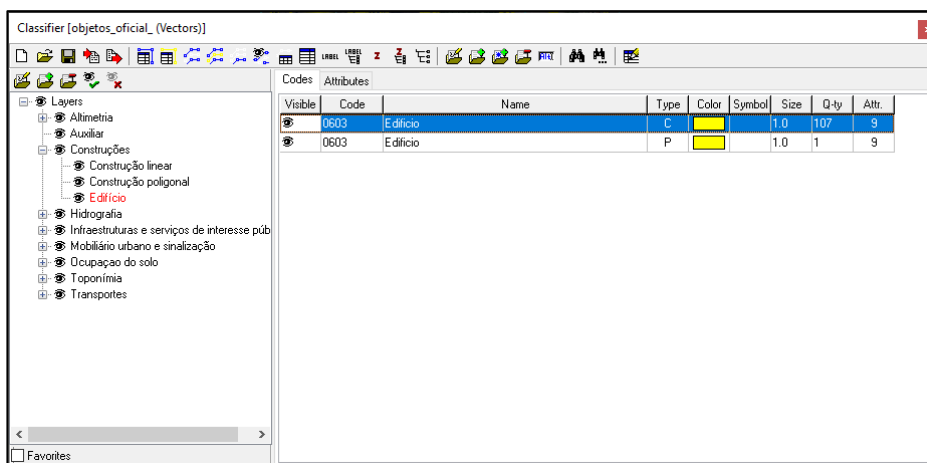


Figura 8.17 – Aspeto da base de dados cartográfica.



a)

Name	Type	Size
valorCondicaoConst	integer	4
valorElementoEdificioXY	integer	4
valorElementoEdificioZ	integer	4
valorFormaEdificio	integer	4
valorUtilizacaoAtual	integer	4
alturaEdificio	float	8
dataConst	text	8
nome	text	8
numeroPolicia	text	8

b)

Figura 8.18 – Organização da base de dados. a) Apresentação dos temas, sub-temas e classes de objetos; b) Apresentação dos atributos pertencentes à classe do objeto das Construções.

Na criação da classe do objeto deparamo-nos com a janela apresentada na Figura 8.19, onde é necessário inserir o código da classe, o nome da classe e o tipo de objeto de acordo com as normas da DGT. No tipo de objeto temos três opções de geometria: o P que corresponde a “Point”, o L correspondente a “Line” e o C correspondente a “Closed Polygon”. A seleção da cor não é importante, servindo apenas para simbologia enquanto se está a restituir.

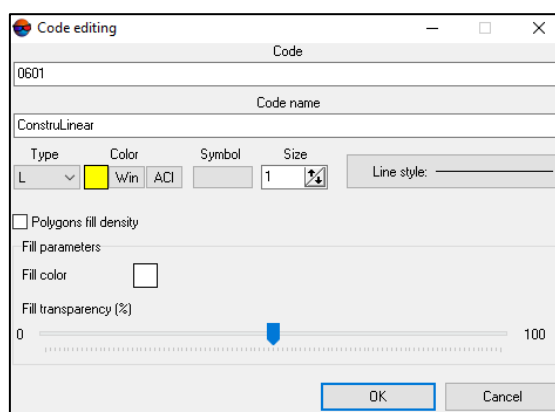


Figura 8.19 – Janela de criação da classe do objeto.

Já na criação dos atributos da classe do objeto, ficamos perante uma janela idêntica à apresentada na Figura 8.20. Neste passo é necessário inserir o nome do atributo, o tipo do atributo, a sua descrição e uma lista de valores, se aplicável, de acordo com as normas anteriormente referidas.

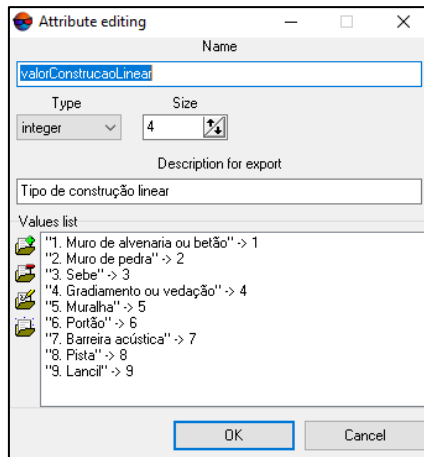


Figura 8.20 – Janela de criação dos atributos para a classe do objeto.

Com a criação do catálogo de objetos a estereorrestituir concluída passa-se para a fase da estereorrestituição. Para iniciar este processo devemos selecionar, a partir do modelo estereoscópico presente na Figura 8.16, o par estereoscópico com que queremos iniciar a estereorrestituição e abrir através da função “*Open new 2D-window for the selected stereopair*”. Após este passo temos acesso às fotografias, que deverão ser visualizadas em 3D pelo modo de anáglifo (Figura 8.21).

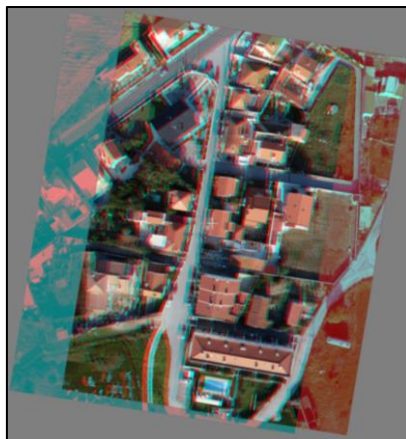


Figura 8.21 – Aspeto do ambiente de trabalho para a estereorrestituição.

Por fim, a estereorrestituição é feita a partir de marcas flutuantes, uma localizada na imagem a vermelho e outra localizada na imagem a azul. O objetivo é colocar ambas as marcas no mesmo ponto, como demonstrado na figura abaixo, o posicionamento das marcas flutuantes é controlado pela roda do rato. O ajuste das marcas flutuantes deve ser verificado todas as vezes que se regista um vértice.

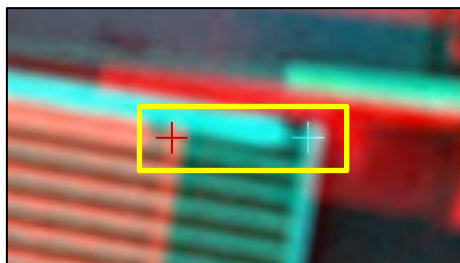


Figura 8.22 – Posicionamento das marcas flutuantes.

Toda a vez que se pretender desenhar um objeto é imperativo pré-selecionar o código (classe) do objeto que se pretende representar, para ter a certeza que não se está a desenhar um objeto com uma classificação errada.

Após o desenho dos elementos dos temas, as normas para a cartografia topográfica exigem a obtenção das alturas dos edifícios. Esta foi obtida a partir da cota do ponto mais alto destes e da cota do solo nas suas imediações.

Após o desenho e preenchimento dos atributos, os objetos serão exportados em formato .shp. Após se exportar todos os objetos, estes irão ser trabalhados em *ArcMap 10.7.1* para corrigir e completar as tabelas de atributos e proceder a correções de topologia, caso sejam necessárias.

8.5 Workflow do ArcGIS

À semelhança dos três pontos anteriores, foi desenhado um *workflow* relativo aos processos feitos em *ArcGIS*, com recurso ao módulo *ArcMap 10.7.1* da ESRI, representado na Figura 8.23.

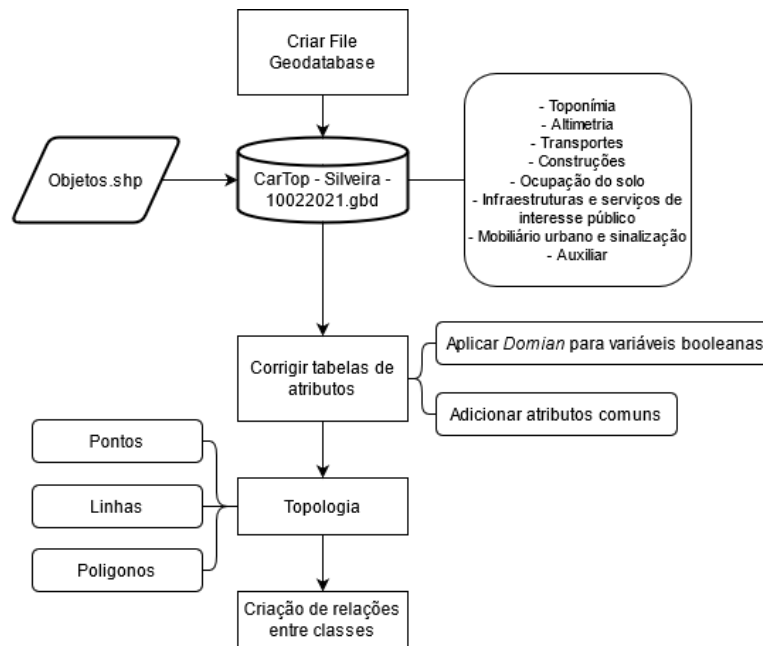


Figura 8.23 – Workflow em ArcGIS.

Como referido na secção 8.5, o *ArcMap* foi utilizado essencialmente para a uniformização dos dados, nomeadamente nas tabelas de atributos, na validação da topologia entre os objetos, na criação das relações entre classes e na apresentação dos resultados.

Para ser mais simples trabalhar toda a informação geográfica, desenhada por estereorrestituição e exportada em formato .shp exportaram-se todas as entidades para a uma file *geodatabase* (GBD), organizando-as nas respetivas *feature datasets* e procedeu-se à correção das tabelas de atributos das entidades de forma a respeitar as normas da DGT.

Após a criação dos atributos em falta – identificador, inicioObjeto e fimObjeto – e à criação dos atributos já existentes a tabela ficou com o aspeto representado na Figura 8.24. O campo SHAPE, como se trata de um atributo intrínseco à shapefile, não pode ser eliminado. Assim foi necessário criar novamente o campo “geometria” que aceite os valores “ponto”, “linha” e “polígono” e desativar o campo SHAPE.

identificador	geometria	inicioObjeto	fimObjeto
1	poligono	10/01/2021	10/01/2021
2	poligono	10/01/2021	10/01/2021
3	poligono	10/01/2021	10/01/2021
4	poligono	10/01/2021	10/01/2021
5	poligono	10/01/2021	10/01/2021
6	poligono	10/01/2021	10/01/2021
7	poligono	10/01/2021	10/01/2021
8	poligono	10/01/2021	10/01/2021
9	poligono	10/01/2021	10/01/2021
10	poligono	10/01/2021	10/01/2021
11	poligono	10/01/2021	10/01/2021
12	poligono	10/01/2021	10/01/2021
13	poligono	10/01/2021	10/01/2021
14	poligono	10/01/2021	10/01/2021

valorCondicaoConst	valorElementoEdificioXY	valorElementoEdificioZ
6	6	9
6	6	9
6	6	9
2	6	7
6	6	9
6	6	9
6	6	9
6	6	9
6	6	9
6	6	9
6	6	9
2	6	9
6	6	9
6	6	9

valorFormaEdificio	valorUtilizacaoAtual	alturaEdificio
27	1	8,834
27	2	4,923
27	1	4,186
4	2	2,219
27	1	6,549
27	2	2,879
27	1	5,815
27	1	3,855
27	1	6,484
27	1	5,366
27	1	6,931
27	1	6,289
27	1	5,4
27	1	6,448

dataConst	nome	numeroPolicia
<Null>	<Null>	<Null>
<Null>	<Null>	<Null>
<Null>	<Null>	<Null>
<Null>	<Null>	<Null>
<Null>	<Null>	<Null>
<Null>	<Null>	<Null>
<Null>	<Null>	<Null>
<Null>	<Null>	<Null>
<Null>	<Null>	<Null>
<Null>	<Null>	<Null>
<Null>	<Null>	<Null>
<Null>	<Null>	2
<Null>	<Null>	1
<Null>	<Null>	3
<Null>	<Null>	9

Figura 8.24 – Aspetto final da tabela de atributos do objeto Edificio.

O mesmo processo foi feito para todas as entidades. É também de notar que todos os campos que não foram preenchidos, ou porque não têm valor ou porque não é um atributo obrigatório nas normas, para o NdD1, foram substituídos pelo valor “<Null>”. Outra alteração teve a ver com os campos que apenas aceitam o tipo de dados *boolean*, ou seja, apenas aceitam valores *True/False*. Como o *ArcMap* não contém esse tipo de dados foi necessário criar um domínio – chamado de *TrueFalse* – para transformar o tipo *integer*, apresentado na secção 8.4, num tipo de dados *string* que transformasse todos os valores 1 em *True* e todos os 2 em *False* (Figura 8.25).

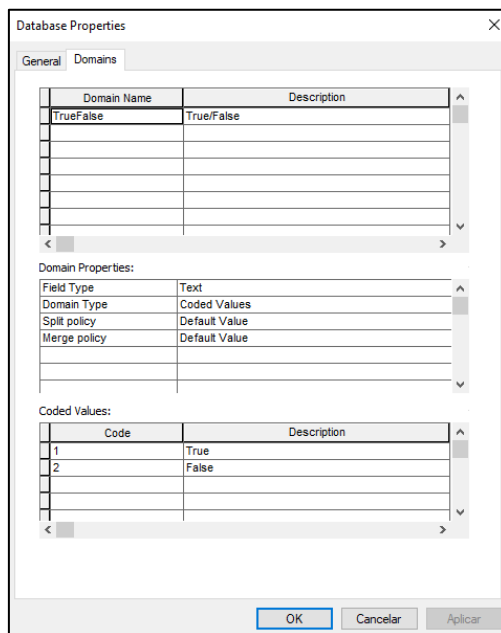


Figura 8.25 – Domínio TrueFalse.

A aplicação deste domínio foi possível ao criar um novo atributo, com o nome respetivo nas normas da DGT, e seleccionar o domínio (Figura 8.26) e estabelecendo o total de caracteres (*length*) para 5, de forma a conservar memória na GBD.

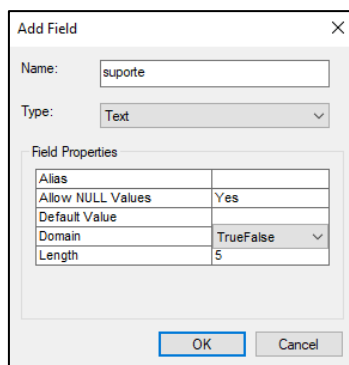


Figura 8.26 – Atribuição do domínio *TrueFalse* a um atributo.

A conversão de *integer* para *string* foi feita através da cópia dos valores de um atributo para outro e assim o domínio converte automaticamente os valores para as chaves estabelecidas na criação do domínio (Figura 8.27).

suporte	suporte
2	False
2	False
2	False
2	False

a)

b)

Figura 8.27 – Aplicação do domínio *TrueFalse*. a) Atributo “suporte” do objeto *ConstruLinear* antes da aplicação do domínio; b) O mesmo atributo após a aplicação do domínio.

Após a edição e correção das tabelas de atributos é a altura de verificar a existência, ou não, de erros topológicos na cartografia.

A topologia é o processo que define as relações espaciais entre as diferentes entidades. Assim sendo, foram criadas topologias para os diferentes temas para verificar se existiam erros topológicos entre as entidades.

Tabela 8.4 – Regras estabelecidas para a topologia.

Polígonos	<i>Must not have gaps</i> <i>Must not overlap</i>
Linhas	<i>Must not overlap</i> <i>Must not have pseudo-nodes</i> <i>Must not self-overlap</i> <i>Must not have dangles</i>
Pontos	<i>Must be covered by endpoint of SegViaRodov</i> <i>Point must be covered by line SegViaRodov</i> <i>Must be covered by endpoint of CaboEletrico</i> <i>Point must be covered by line CaboEletrico</i>

Na Tabela 8.4 estão expostas as regras definidas para a topologia, baseadas nas especificações contidas na consistência topológica das normas da DGT. No que toca aos polígonos foram definidas as regras de não existir espaços vazios entre os polígonos, para verificar se existiam espaços vazios entre polígonos contíguos, sendo os restantes adicionados como exceção, e de não existir sobreposições entre polígonos da mesma classe; nas linhas foram definidas as regras das linhas não se sobreporem, não existirem pseudo-nós, não se auto-sobreporem e garantir que não existem conexões ausentes (*Must not have dangles*), em casos que essas conexões tenham que existir, caso contrário marcar como exceção; por fim, em relação aos pontos, apenas se justificou definir topologia para o tema dos transportes e infraestruturas e serviços de interesse público, pois eram os únicos temas em que os pontos partilhavam os mesmos limites com outras entidades, nomeadamente os nós de transporte rodoviários e os elementos

associados à eletricidade e telecomunicações com os segmentos de via e os cabos elétricos, respetivamente. Após a criação e validação da topologia, é necessário analisar todos os erros existentes e decidir a melhor forma de os corrigir e, em situações em que esses erros são justificáveis, marcar como exceção.

A estrutura formal das classes dos objetos, os seus atributos e relações entre elas é definida pelo seu diagrama de classes – escrita em *Unified Modeling Language* (UML). As normas da DGT fornecem o modelo que as classes devem obedecer no seu Anexo I. Depois de validada a topologia o próximo passo foi a criação de relações entre as classes, seguindo o modelo fornecido pela DGT. Estas relações podem ter várias multiplicidades: (1) 1..1, onde um valor de uma tabela está associado a apenas um valor de outra tabela; (2) 0..1, nenhum, ou vários, valores de uma tabela estão associados a apenas um valor de outra tabela; (3) 0..*, onde nenhum, ou vários, valores de uma tabela podem estar associados a vários valores de outra tabela; (3) 1..*, onde um valor de uma tabela está associado a um, ou vários, valores de outra tabela; e (4) *.* , onde vários valores de uma tabela estão associados a vários valores de outra tabela.

Tendo em conta os objetos obtidos por estereorrestituição, apenas foi necessário criar cinco relações entre as classes SegViaRodov e ViaRodov (ligacaoSegViaRodovViaRodov), SegViaRodov e ViaRodovLimite (ligacaoSegViaRodovViaRodovLimite), AreaInfraTransRodov e InfraTransRodov (ligacaoAreaInfraTransRodovInfraTransRodov), entre as classes InfraTransRodov e noTransRodov (ligacaoInfraTransRodovNoTransRodov) e entre InstProducao e Edificio (ligacaoInstProducaoEdificio). A criação destas relações é feita através de classes (ou tabelas) de relação (Figura 8.28) – ou *relationship classes*. Cada par de classes de objetos acima descritas tem uma relação entre elas e a sua multiplicidade está presente no diagrama UML disponível no Anexo I das normas da DGT.

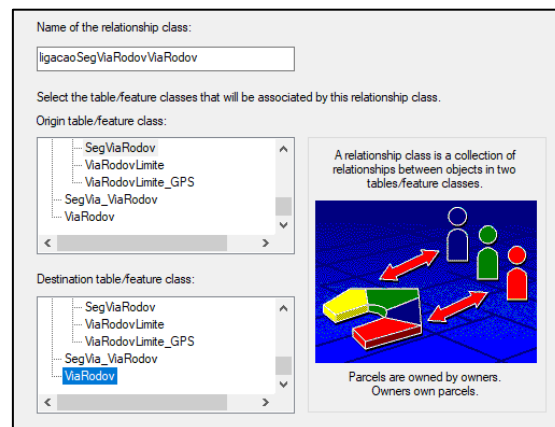


Figura 8.28 – Criação das relações entre tabelas em ArcMap.

No decorrer da criação de relações, observou-se que a utilização desta ferramenta para a criação de relações “*..*” não funcionava. Para contornar este problema foi criada uma tabela associativa – tabela que contenha duas chaves estrangeiras para as chaves primárias das tabelas a relacionar. Este problema aconteceu para a relação ViaRodov e SegViaRodov. Criou-se uma tabela associativa “SegVia_ViaRodov” com dois atributos “SegVia” que serve de chave estrangeira para o atributo “identificador” da classe “SegViaRodov” e o atributo “ViaRodov” que serve de chave estrangeira para o atributo “identificador” da classe “ViaRodov”. Depois de criada esta tabela utilizou-se a ferramenta “*Table to Relationship Class*” e preencheram-se os parâmetros necessários para a criação de uma relação *.* , ou *many-to-many*.

No final deste processo é possível que, ao utilizar a ferramenta “Identify” em qualquer uma das classes acima descritas, tenhamos acesso aos atributos das classes relacionadas, como demonstrado na Figura 8.29.

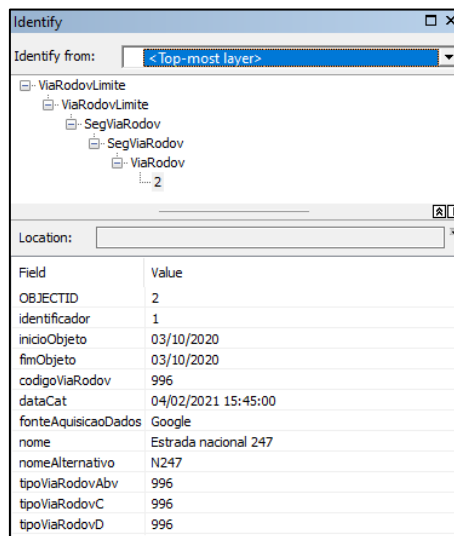


Figura 8.29 – Exemplo de demonstração das relações entre ViaRodov, SegViaRodov e ViaRodovLimite.

Para a avaliação da qualidade da estereorrestituição, após a aplicação da topologia, converteram-se os objetos dos limites de via rodoviária (ViaRodovLimite) e das construções lineares (ConstruLinear) de linhas para pontos, através da ferramenta “Feature Vertices To Points”. Após a conversão dos objetos, selecionaram-se os pontos pretendidos para utilizar no controlo de qualidade e para levantar no terreno, com recurso a GPS, e os pontos restantes foram eliminados.

8.6 Controlo de qualidade

Como referido na secção **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, depois de obtidos e tratados todos os produtos cartográficos é necessário avaliar a sua exatidão absoluta, tanto planimetricamente como altimetricamente. De acordo com as normas da DGT a “exatidão posicional absoluta traduz a proximidade das coordenadas dos dados às coordenadas das entidades determinadas no mundo real através de metodologias de posicionamento rigorosas” (DGT, 2020). Para o controlo de qualidade utilizaram-se pontos cotados, já existentes de um projeto anterior, para aferir a exatidão altimétrica dos MDT e coordenaram-se pontos, por técnicas precisas GNSS, em esquinas de muros e limites das vias rodoviárias para aferir a exatidão altimétrica e planimétrica dos objetos restituídos e da ortofoto.

De acordo com as normas anteriormente referidas, a exatidão absoluta dos dados é determinada a partir do calculo do EMQ que se trata de uma “medida estatística que mede a qualidade de observações” (DGT, 2020). Nas mesmas normas, a DGT fornece as fórmulas para a aplicação do método para a planimetria:

(8.1)

$$EMQ_{MP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((M_{iT} - M_{iC})^2 + (P_{iT} - P_{iC})^2)}{n}}$$

E para a altimetria:

(8.2)

$$EMQ_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{iT} - Z_{iC})^2}{n}}$$

A descrição de cada variável está disponível na Tabela 8.5:

Tabela 8.5 – Lista de variáveis necessárias para a aplicação do EMQ
[Adaptado de DGT, 2020].

Descrição	Variável
Número de pontos da amostra	n
Coordenadas planimétricas exatas do ponto i	M_{iT} , P_{iT}
Coordenadas planimétricas do ponto i medidas na representação dos objetos	M_{iC} , P_{iC}
Coordenada altimétrica exata do ponto i	Z_{iT}
Coordenada altimétrica do ponto i medida na representação dos objetos	Z_{iC}

Para a avaliação da exatidão absoluta altimétrica dos MDT foram comparadas as cotas dos pontos selecionados com as cotas registadas nos MDT com a ferramenta “*Identify*” do *software ArcMap 10.7.1*. A comparação foi feita selecionando-se o ponto em questão, definir a escala 1:1 e clicando com a ferramenta no ponto. Ao clicar no ponto, o ponto será identificado pela ferramenta e selecionará o *pixel* correspondente do MDT ao ponto apresentando uma janela idêntica à da Figura 8.30.

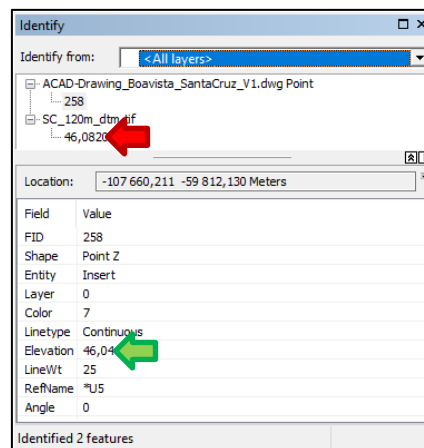


Figura 8.30 – Aspecto da ferramenta *Identify*.

Nesta janela estão presentes a cota de referência, obtida por técnicas GNSS, do ponto i – no campo *Elevation* (seta verde) – e a cota do ponto i no MDT (seta vermelha). Estes valores de cota foram copiados para o *software Microsoft Excel* e foi calculado o EMQ altimétrico.

De acordo com as normas da DGT, o EMQ para a exatidão absoluta altimétrica para os MDT – para o NdD1 – não pode ultrapassar 0.45 m e 90% dos pontos comparados deve apresentar valores de desvio de cota iguais ou inferiores a 0.75 m. Para o controlo de qualidade dos MDT serão avaliados um total de 46 pontos distribuídos pela área de estudo (Figura 8.31 a)).

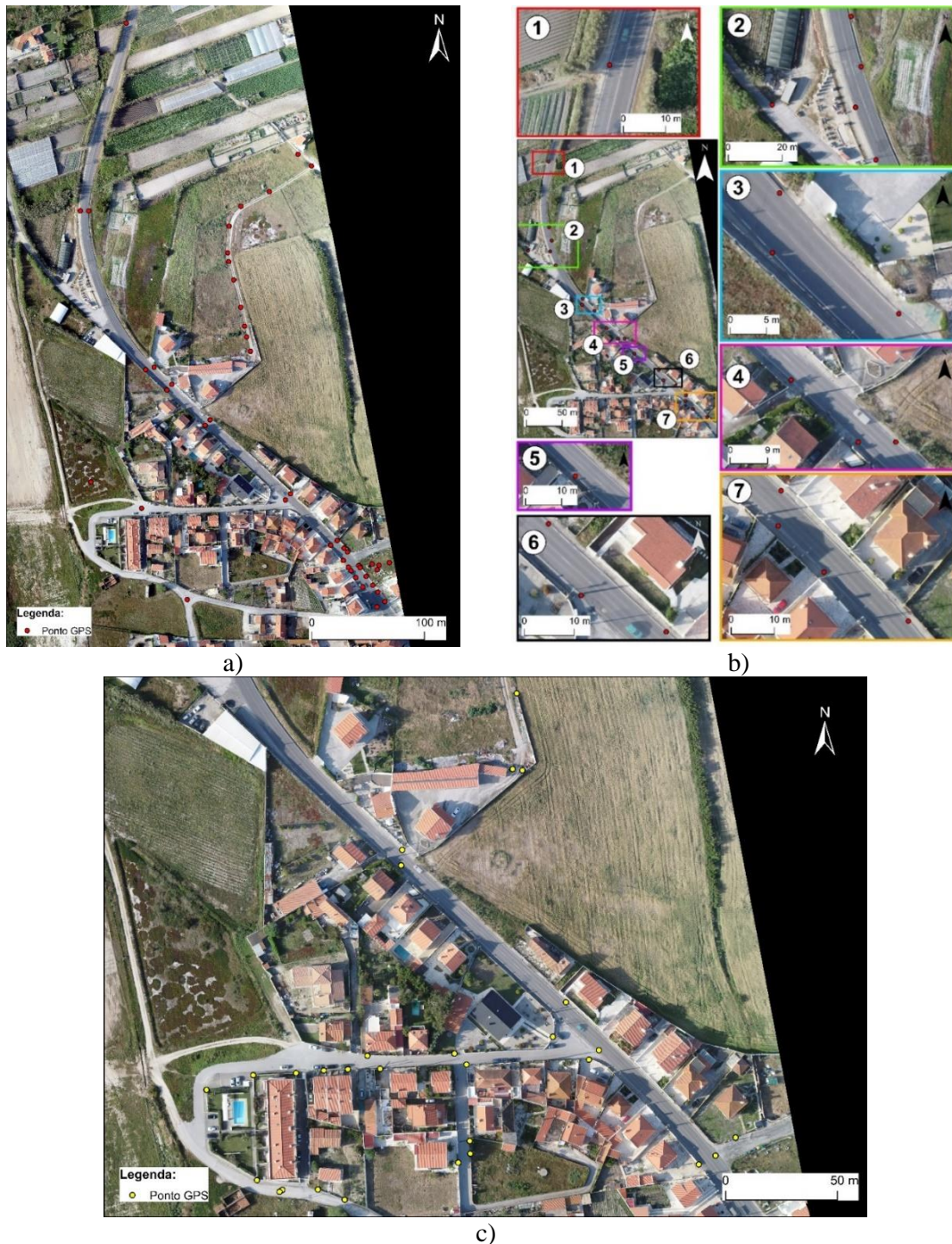


Figura 8.31 – Pontos coordenados por GPS para o controlo de qualidade. a) Pontos utilizados para o controlo de qualidade dos MDT; b) Pontos (a vermelho) nos limites da rodovia; c) Pontos (a amarelo) nas caixas de visita e esquinas de muros.

Para a avaliação da exatidão absoluta altimétrica e planimétrica dos objetos restituídos, foram medidos novos pontos nos limites da via rodoviária, caixas de visita e esquinas de muros. Todos os pontos medidos tiveram como objetivo a avaliação da exatidão planimétrica e pontos nas estradas e caixas de visita foram utilizados também para a exatidão altimétrica.

Os pontos para a altimetria foram todos posicionados em linhas a tracejado coincidentes com os pontos restituídos e em caixas de visita de forma a que os pontos sejam todos coincidentes na comparação para o EMQ, como se pode ver na Figura 8.31 b).

Os restantes pontos, as esquinas de muros e caixas de visita, estão representadas na Figura 8.31 c). No total foram considerados 48 pontos para a avaliação da exatidão planimétrica e 28 pontos para a exatidão altimétrica.

Como é possível observar nas figuras anteriores, não serão levantados pontos GPS na implantação dos edifícios. Devido às restrições impostas no contexto da pandemia do SARS-CoV-2 na altura do projeto, de forma a evitar contacto com os proprietários e não interferir com a sua privacidade, não foram levantados pontos nos edifícios.

Para a exatidão planimétrica dos dados a DGT estabelece, para o NdD1, uma exatidão igual ou superior a 0,30 metros, em que 90% dos pontos da amostra devem ter uma exatidão igual ou superior a 0,45 metros. Para a altimetria, a exatidão mínima é de 0,40 metros e 90% dos pontos da amostra devem ter valores iguais ou inferiores a 0,65 metros.

Para termos acesso às coordenadas XYZ de todos os vértices dos objetos restituídos, foi necessário converter os objetos de *shapefile* para ficheiro CAD, para posteriormente serem comparados em ambiente *AutoCAD 2021*, como referido abaixo.

Para testar a exatidão absoluta planimétrica e altimétrica foi utilizado o *software AutoCAD 2021* pela razão de se ter acesso às coordenadas X, Y e Z – ou M, P e C, respetivamente – de todos os pontos. Para a recolha das coordenadas seleciona-se o ponto pretendido e retira-se os valores das suas coordenadas (Figura 8.32) para uma folha de cálculo para se efetuar os cálculos para o EMQ. Este processo foi feito para todos os pontos levantados no terreno e nos pontos correspondentes da restituição.

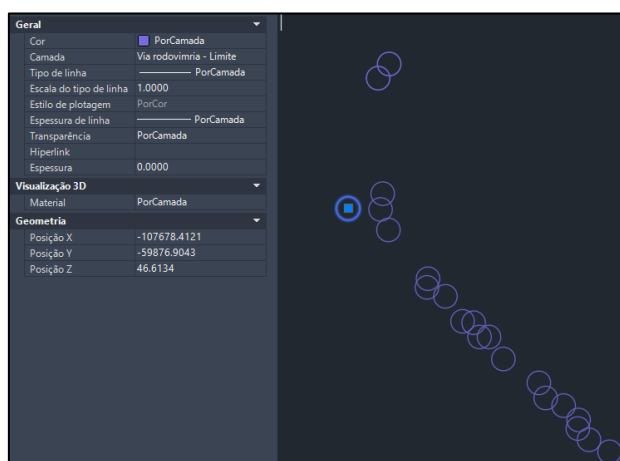


Figura 8.32 – Extração das coordenadas dos pontos para o controlo de qualidade em ambiente *AutoCAD 2021*.

Em relação ao controlo de qualidade da exatidão absoluta planimétrica da ortofoto serão utilizados os pontos de GPS utilizados para a avaliação da exatidão altimétrica e planimétrica da estereorrestituição.

Para a exatidão planimétrica das ortofotos as normas estabelecem, para o NdD1, uma resolução espacial de 10 cm, ou caso se justifique podem ser utilizadas resoluções espaciais de 5 cm e uma exatidão posicional igual ou superior a 0.30 m, sendo que 90% dos dados da amostra devem apresentar desvios iguais ou inferiores a 0.45 m.

A avaliação da exatidão planimétrica da ortofoto é feita comparando os pontos de GPS tirados no terreno com pontos marcados sobre a ortofoto. À semelhança dos métodos anteriores, depois de marcados os pontos sobre a ortofoto, retiram-se as coordenadas X e Y para um ficheiro excel e as coordenadas X e Y dos pontos correspondentes do levantamento GPS e calcula-se o EMQ. Os pontos considerados para o controlo de qualidade da ortofoto estão apresentados na Figura 8.33. Foram considerados um total de 52 pontos para a avaliação da exatidão planimétrica da ortofoto.



Figura 8.33 – Pontos utilizados para o controlo de qualidade da ortofoto.

Por fim, realizou-se também um controlo de qualidade às curvas de nível e pontos cotados restituídos interactivamente. Como estas classes são linhas e pontos imaginários, não é possível coordenar pontos por GPS para se fazer um controlo de qualidade semelhante aos elementos anteriores. Este controlo de qualidade consistiu no cálculo do EMQ de todos os vértices das curvas de nível face ao MDT de maior resolução espacial (50 cm) e o cálculo do EMQ de todos os pontos cotados face ao mesmo MDT. No entanto, o cálculo do EMQ por si só não serve como um bom estimador de qualidade posicional, devido ao desvio existente entre estes elementos da altimetria e o MDT e o próprio desfasamento do MDT face ao terreno. De forma a estimar o desvio entre a restituição e o terreno utilizou-se a lei da propagação dos erros aleatórios (8.3) para a avaliação da qualidade posicional das curvas de nível e para os pontos cotados.

(8.3)

$$EMQ(Altimetria - Terreno) = \sqrt{EMQ(Altimetria)^2 + EMQ(MDT)^2}$$

Em relação ao facto de 90% dos pontos avaliados terem de assumir desvios iguais, ou inferiores, a 0.65 m, foi somado o EMQ calculado do MDT de 50 cm de resolução espacial a todos os desvios entre os vértices das curvas de nível e o MDT e entre os pontos cotados e MDT. Depois desta soma, verificou-se se, pelo menos, 90% dos pontos respeitam a precisão exigida pelas normas da DGT.

9. Resultados e discussão

Neste capítulo serão analisados e discutidos todos os resultados obtidos no decorrer dos processos realizados anteriormente.

9.1 Relatório Pix4D

Neste ponto serão apresentados alguns dos resultados mais relevantes para análise de todo o processo realizado no Pix4D.

Neste projeto, como referido na secção 8.2.3 foram utilizadas 732 fotografias das quais 5 foram desativadas. Assim sendo, foram calibradas 727 fotografias com sucesso registando uma mediana de

75757 de pontos conspícuos por imagem e uma mediana de 46185.3 correspondências por cada fotografia calibrada. Para este projeto foram utilizados 11 Pontos de Controlo e 9 Pontos de Verificação.

O relatório começa por fazer referência ao deslocamento entre a posição inicial das fotografias e a posição calculada pelo Pix4D, bem como o deslocamento entre a posição inicial dos pontos de controlo e a posição calculada (Figura 9.1). Para além da representação dos deslocamentos entre as posições iniciais e calculadas das fotografias e pontos de controlo, também é fornecida uma vista frontal XZ e uma vista lateral YZ desses deslocamentos ampliados 500 vezes.

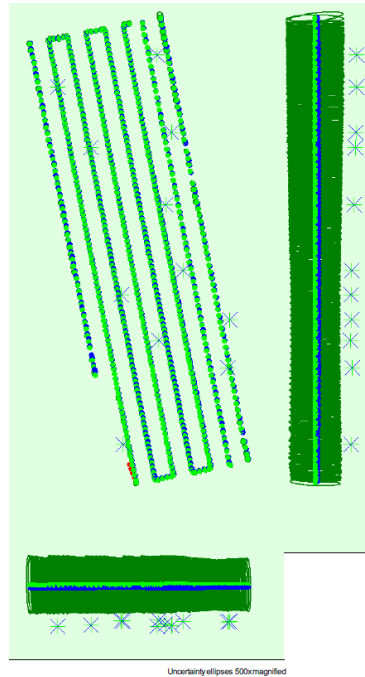


Figura 9.1 – Deslocamento entre a posição inicial das fotografias (pontos azuis) e a posição calculada (pontos verdes); Deslocamento entre a posição inicial dos pontos de controlo (cruzes azuis) e a posição calculada (cruzes verdes); em baixo, vista frontal dos deslocamentos em XZ; ao lado direito, vista lateral dos deslocamentos em YZ; os pontos vermelhos representam as fotografias desativadas; as elipses verde-escuras representam a incerteza da posição absoluta das fotografias (500x ampliada) resultante do ajustamento do bloco.

Em relação às incertezas na posição absoluta e da orientação da câmara, o *software* Pix4D apresenta também uma tabela referente a esses valores de incerteza (Tabela 9.1). Desta forma, a tabela é composta pela média e sigma das incertezas em XYZ, em metros, *Omega*, *Phi* e *Kappa*, em graus. As incertezas em XYZ são referentes às incertezas nas coordenadas absolutas da posição da câmara, enquanto que as incertezas em *Omega*, *Phi* e *Kappa* são referentes aos ângulos de orientação absoluta da posição da câmara.

Tabela 9.1 – Tabela de incertezas da posição absoluta e orientação da câmara

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [grau]	Phi [grau]	Kappa [grau]
Média	0.012	0.014	0.188	0.005	0.004	0.001
Sigma	0.002	0.003	0.012	0.001	0.001	0.000

De acordo com a tabela, observa-se que a média de incertezas nas coordenadas absolutas da câmara é, no geral, muito boa, registando incertezas de 1.2 e 1.4 centímetros em X e Y, respetivamente, pecando nas incertezas em Z que registam uma média de 18.8 cm de incerteza. Em relação aos valores de Sigma – valor de variação em torno da média, ou desvio-padrão – em XYZ estes confirmam os valores da média não existindo grande variação em relação à média, variando 2 mm em X, 3 mm em Y e 1,2 cm em Z.

Quanto aos valores de incerteza dos ângulos de orientação absoluta da câmera, é de notar que os graus de incerteza são mínimos, registrando médias de incerteza de 0.005 graus em *Omega*, 0.004 em *Phi* e 0.001 em *Kappa* e *Sigmatas* que confirmam, novamente, os valores da média registrando em *Omega* e *Phi* desvios-padrão de 0.001 e em *Kappa* um desvio-padrão igual a 0 graus de incerteza.

Outro elemento importante neste relatório é o mapa de sobreposição de imagens, presente na Figura 9.2 a). Este mapa é importante para que o utilizador verifique se tem, ou não, uma boa cobertura fotográfica da área para o projeto, ou se a área de interesse tem uma boa sobreposição das fotografias. A sobreposição de fotografias é importante para o aumento da precisão dos pontos de interesse, ou conspícuos, do bloco, assim, quanto maior o número de fotografias sobrepostas, maior a precisão dos pontos calculados. Observando o mapa, conclui-se que as extremidades do projeto apresentam um menor número de sobreposição de fotografias, esta situação acontece em todos os projetos fotogramétricos, sendo necessário, quando do planejamento do voo, fotografar uma área maior que a área de interesse. Excluindo as extremidades, toda a restante área tem uma excelente cobertura fotográfica, registrando uma sobreposição de 4 ou mais fotografias.

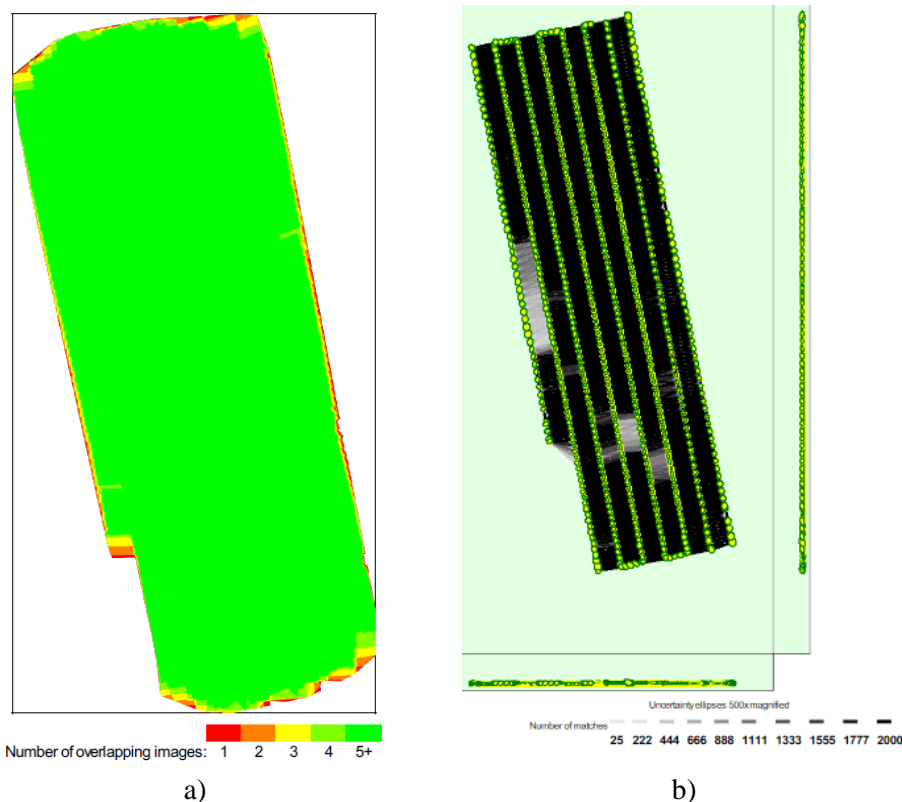


Figura 9.2 – Qualidade da cobertura aerofotográfica. a) Mapa do número de sobreposições de fotografias calculadas por cada pixel do ortofotomapa; b) Correspondências entre os pontos conspícuos 2D (gradiente entre as cores cinza e preto). As elipses verde-escuras representam a incerteza da posição relativa da câmara (500x ampliada) do resultante do ajustamento do bloco.

Uma boa sobreposição de fotografias é dos principais segredos para que todo o projeto tenha sucesso. O primeiro passo de um projeto fotogramétrico no *Pix4D* começa com o processamento inicial das fotografias que tem como objetivo calcular os pontos conspícuos presentes nas fotografias para determinar as orientações interna e externa das fotografias. Estes pontos conspícuos são usados para encontrar ligações entre as fotografias do projeto e é a partir destes que o *software* processa a ATA e o BBA. Dada a importância dos pontos conspícuos, o relatório fornecido pelo *software*, dá informação acerca destes, presentes na Tabela 9.2 e Figura 9.2 b).

Tabela 9.2 – Tabela de pontos conspícuos 2D

	Número de pontos conspícuos 2D por fotografia	Número de correspondência dos pontos conspícuos 2D por fotografia
Mediana	75 757	46 185
Mínimo	41 621	25 808
Máximo	88 761	57 207
Média	73 368	45 040

De acordo com a tabela, após o processamento inicial, o *software* conseguiu calcular um máximo de 88 761 pontos conspícuos e uma média de 73 368 por fotografia. Quanto às correspondências desses pontos, foram correspondidos um máximo 57 207 pontos por fotografia, contabilizando uma média de 45 040 de correspondências, por fotografia. Para complementar a tabela, o relatório contém ainda um mapa que ilustra as correspondências entre as fotografias (Figura 9.2 b)). Neste mapa as linhas mais escuras correspondem a um maior número de correspondências entre fotografias enquanto que as mais claras representam uma menor correspondência e recomenda-se a adição de PF. Tal como no mapa de deslocamento entre a posição inicial das fotografias (Figura 9.1), também são ilustradas as elipses de incerteza da posição, desta vez relativa, da posição da câmara no ajustamento do bloco, a verde escuro, numa visão frontal XZ, em baixo, e lateral YZ, no lado direito. Analisando o mapa, é possível concordar que quase toda a área do projeto apresenta pelo menos 1555 correspondências. As únicas zonas em que a correspondência foi menor, foi na zona Oeste e na zona Sul do projeto. Como dito anteriormente, esta falta de correspondências pode ser melhorada com a adição de PF, que foi feito após o processamento inicial e reotimizado, ou com a adição de pontos de ligação manuais.

Para aumentar o número de correspondências entre as fotografias e aumentar a precisão da ATA e do BBA, foram marcados, coordenados e adicionados PF e posteriormente feito a reotimização do processamento inicial.

Tabela 9.3 – Tabela de precisão dos Pontos de Controlo (PF).

GCP	Desvio X [m]	Desvio Y [m]	Desvio Z [m]	Erro projeção [px]	Identificados/Marcado
102	0.009	0.006	0.000	0.396	24/24
104	0.000	0.004	-0.002	0.339	17/17
105	0.004	-0.018	0.012	0.227	13/13
106	0.001	0.006	-0.004	0.427	23/23
108	0.020	0.004	-0.015	0.256	19/19
110	0.026	0.050	-0.041	0.162	5/5
111	-0.020	0.003	0.009	0.144	10/10
116	-0.008	-0.001	-0.004	0.235	9/9
119	0.011	-0.009	-0.018	0.448	14/14
121	-0.014	-0.018	0.009	0.446	18/18
137	-0.009	-0.003	-0.002	0.610	22/22
Média [m]	0.001	0.002	-0.005	0.335	
Sigma [m]	0.013	0.017	0.014		
EMQ [m]	0.013	0.017	0.015		

Em relação aos pontos de controlo, pode-se verificar, através da última coluna, que todos os pontos identificados nas fotografias, foram marcados com sucesso, ou seja, em todas as fotografias em que o ponto era visível, esse ponto foi marcado no *software*. Passando para a análise X, Y e Z dos pontos

é de notar que a média dos desvios registados em X foi de aproximadamente 1 mm, em Y de 2 mm e em Z de uma média negativa de 5 mm, estes valores da média revelam uma média de desvio muito boa situando-se entre os -5 mm e 1 mm. No entanto, os valores de Sigma para XYZ não permitem que se confirmem as médias anteriormente referidas, isto porque o valor de variação da média (*Sigma*) é muito maior que a média, fazendo com que a média não seja um bom estimador da precisão dos pontos de controlo. Mais se acrescenta que a razão da média das precisões em XYZ ser tão baixa tem a ver com a presença de valores de precisão negativos, que por sua vez influenciam o resultado da média aritmética.

Dado a média aritmética dos desvios em XYZ não se revelar um bom estimador de precisão por causa dos valores altos de *Sigma*, o *Sigma* não será considerado estimador de precisão dos pontos de controlo pois retrata a variação dos valores em torno da média. Assim sendo, o valor do Erro Médio Quadrático (EMQ), como é geralmente considerado, será o estimador de precisão dos pontos de controlo e verificação deste projeto. O EMQ trata-se de um bom estimador de precisão pois o seu resultado não é afetado por variáveis negativas, sendo todas calculadas pelo seu quadrado, outra razão para se considerar o EMQ o melhor estimador de precisão é a sua proximidade aos valores de *Sigma*. Tendo em conta o EMQ, os desvios em X são aproximadamente ± 0.013 m, ± 0.017 m em Y e ± 0.015 m em Z, resultados que se apresentam animadores para o projeto.

Por fim, em relação aos erros de projeção – que compara, a partir da orientação externa das fotografias, as coordenadas 3D do terreno com as coordenadas píxel – é possível observar que a reprojeção dos pontos de controlo foi bastante precisa não registando erros acima os 0.610 píxels, sendo esse o valor máximo, e o mínimo de erro de 0.162, e a média desses erros foi de 0.335 *píxels*, ou seja, cerca de 1/3 de píxel.

De seguida, são dados os resultados dos pontos de verificação (Tabela 9.4), tal como aconteceu nos pontos de controlo, todos os pontos de verificação considerados foram marcados e verificados com sucesso.

Tabela 9.4 – Tabela de precisão dos Pontos de Verificação

Ponto de Verificação	Desvio X [m]	Desvio Y [m]	Desvio Z [m]	Erro projeção [px]	Verificado/Marcado
100	0.074	-0.001	-0.005	0.472	11/11
101	0.007	0.030	-0.058	0.357	23/23
103	-0.022	0.021	0.014	0.452	22/22
107	0.056	0.017	0.015	0.227	12/12
109	0.032	0.018	-0.006	0.383	25/25
115	0.027	0.004	0.043	0.378	16/16
117	-0.038	-0.047	-0.062	0.498	14/14
139	-0.008	-0.014	-0.047	0.425	24/24
135A	0.02	-0.024	-0.010	0.227	7/7
Média [m]	0.016	0.005	-0.01	0.380	
Sigma [m]	0.034	0.023	0.034		
EMQ [m]	0.038	0.023	0.036		

O EMQ, em X é de ± 0.038 m, ± 0.024 m em Y e ± 0.037 m em Z. Visto que os pontos de verificação, ou *check-points*, servem para avaliar a qualidade da AT e a qualidade dos produtos gerados, os valores obtidos revelam a elevada qualidade da AT e do levantamento.

À semelhança dos pontos de controle, não existiram erros de reprojeção superiores a 1 píxel, registando um máximo de 0.4985 píxels de erro, um erro mínimo de 0.227 píxels e uma média de 0.380 píxels.

9.2 Nuvem de pontos e 3D Mesh

Concluída a segunda fase do projeto, a criação da nuvem de pontos densificada e da *3D Mesh*, chegou-se aos resultados visíveis nas Figura 9.3 e Figura 9.4, respetivamente.

Em relação à nuvem de pontos densificada (Figura 9.3) é possível observar que o modelo apresenta uma grande densidade de pontos em toda a sua extensão, sendo possível observar pormenores nos telhados, nas terras lavradas, nos telhados das estufas, bem como na vegetação. Como apenas foram feitos voos verticais nota-se apenas a falta de pontos nas fachadas dos edifícios e na vegetação de maior elevação.

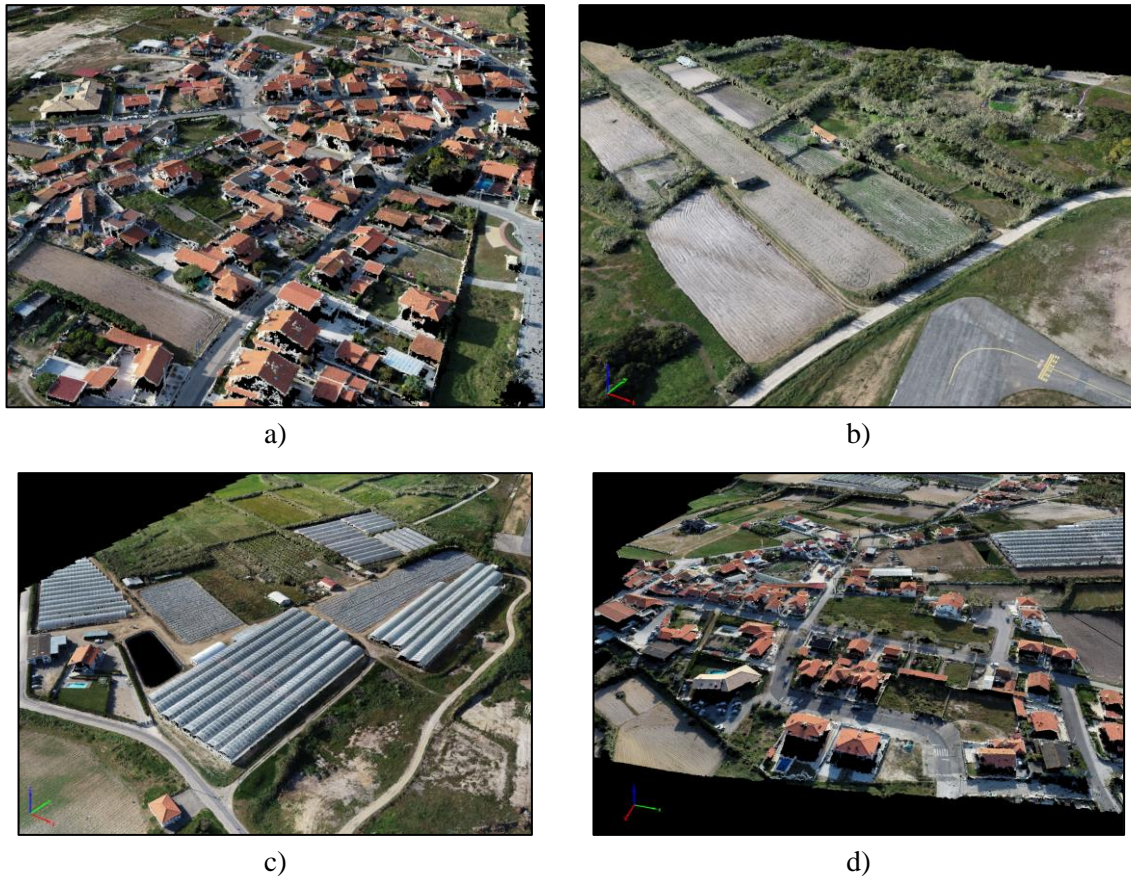


Figura 9.3 – Núvem de pontos densificada.

A densificação dos pontos foi dividida em 5 secções. Destas secções foram densificados um total de 75 887 612 pontos 3D, o que equivale a uma média de 58,58 pontos por metro quadrado.

Em relação ao aspeto da *3D Mesh*, é possível notar que algumas texturas dos telhados sofreram com a triangulação da nuvem de pontos densificada, por exemplo como se pode ver na Figura 9.4 a) e d), ficando com um aspeto ondulado. Este facto pode ter sido provocado pela própria textura do telhado que possa ter provocado esse efeito, ou pela existência de ruído que não tenha sido notado na nuvem de pontos densificada. Em relação à vegetação (Figura 9.4 b) e c)) e às estufas, verifica-se que a triangulação dos pontos preservou os elementos principais como as vigas das estufas, as fachadas destas e a interpolação da vegetação considera-se realista. Por fim, em relação às fachadas dos edifícios, a falta de pontos 3D na nuvem de pontos densificada e a triangulação desses pontos originaram o efeito apelidado “queijo derretido”, ou seja, a interpolação das fachadas provoca um aspeto, ou textura, irrealista, fazendo parecer que a textura está a derreter, como é possível observar nas Figura 9.4 a) e d) e Figura 9.6.



a)



b)



c)



d)

Figura 9.4 – 3D Mesh.

De forma a tentar atenuar as deformações existentes na 3D Mesh foi feita a edição – através da eliminação de pontos ou criação de superfícies – e reclassificação da nuvem de pontos. Alguns exemplos estão representados nas Figura 9.5 e Figura 9.6. Nelas é possível ver as deformações da 3D Mesh antes da edição (esquerda), o tipo de solução utilizada para atenuar as deformações (direita) e o resultado da aplicação dessa solução (baixo).

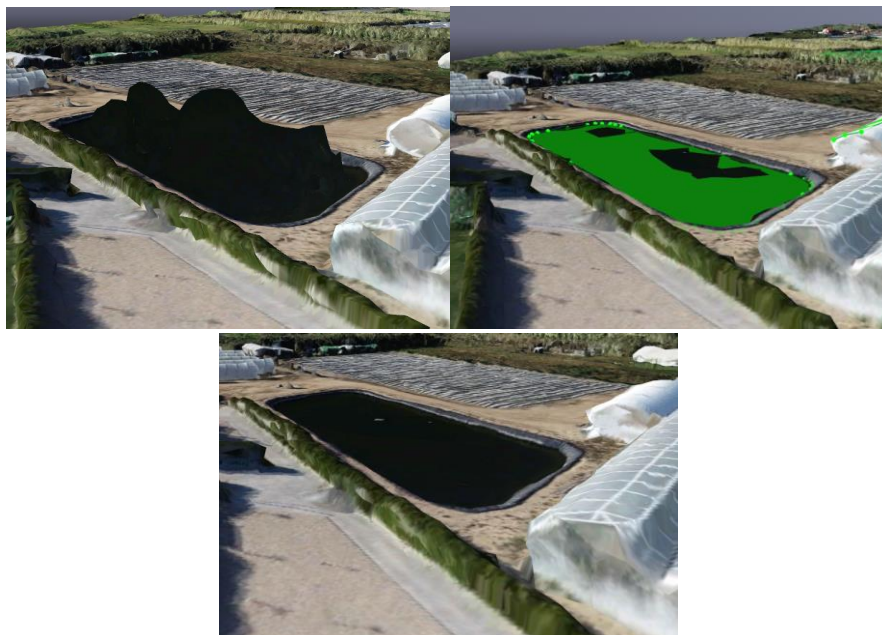


Figura 9.5 – Exemplo da edição de nuvem de pontos com geração de planos artificiais (1).

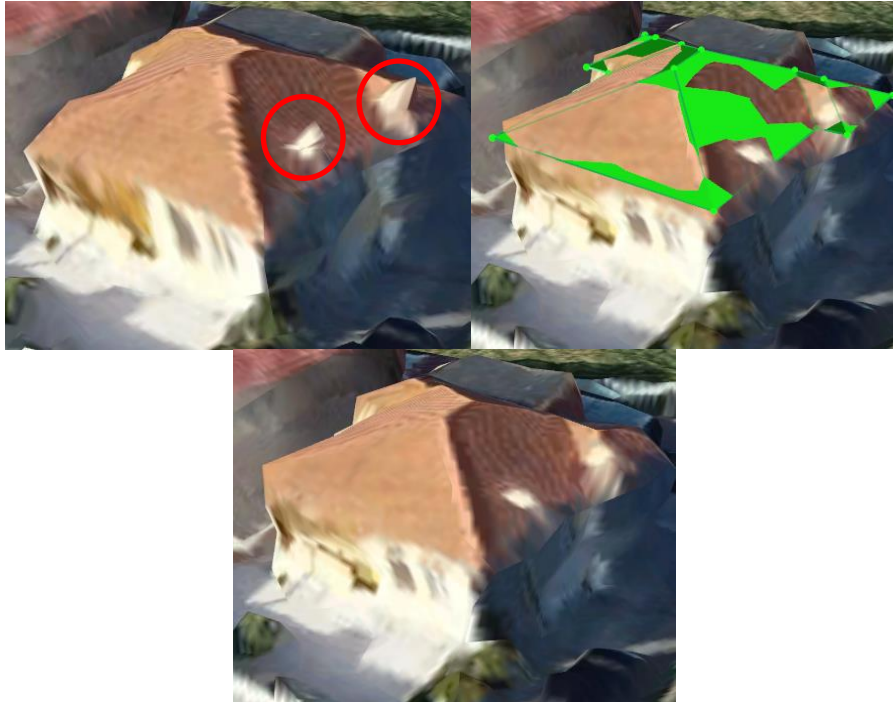


Figura 9.6 – Exemplo da edição da nuvem de pontos com geração de planos artificiais (2).

Como é possível ver na Figura 9.6 não foram registadas grandes diferenças entre os dois resultados, ambos os telhados, antes e depois, continuam com texturas irrealistas e as suas formas e fachadas continuam com o aspeto derretido referido anteriormente. No entanto é impossível negar a pequena melhoria das formas dos edifícios e de outras deformações, por exemplo na Figura 9.6 é possível notar que um dos cantos do telhado foi corrigido e as duas formas irregulares (dentro dos círculos vermelhos) foram corrigidas. Este tipo de deformações acontece em todo o projeto. Por sua vez, na Figura 9.5 é possível ver que as deformações ocorridas no reservatório de água foram corrigidas com sucesso.

Estas deformações em edifícios ocorrem devido à altitude em que foram tiradas as fotografias e pelo voo ter sido feito verticalmente. De forma a obter melhores resultados seria necessária a realização de voos mais baixos, voos cruzados, para termos maior cobertura fotográfica, voos oblíquos, de forma a obter mais informação das fachadas dos edifícios e efetuar um apoio topográfico mais denso na área de estudo. Caso o nível de detalhe necessário para a *3D Mesh* fosse mais exigente, seria ainda aconselhado fazer um levantamento fotográfico terrestre para as fachadas.

9.3 Modelo Digital de Superfície

Como referido na secção 8.3, após a geração da nuvem de pontos densa foi necessário editar e/ou corrigir essa mesma nuvem mantendo-se as duas versões de forma a poder fazer uma comparação. Assim, com a conclusão da terceira fase do projeto em *Pix4D*, foram gerados dois Modelos Digitais de Superfície ilustrados na Figura 9.7.

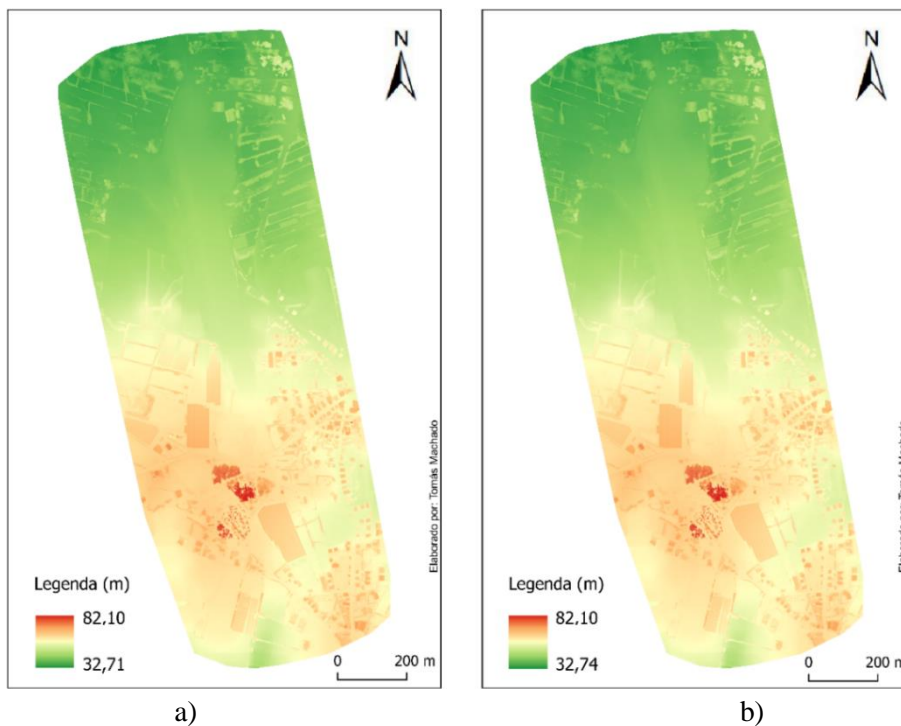


Figura 9.7 – MDS com resolução de 5 cm. a) MDS resultante da nuvem de pontos sem edição; b) MDS resultante da nuvem de pontos após a edição.

Colocando os dois resultados lado a lado não é fácil notar as diferenças, que são quase imperceptíveis. A única notória, à escala em que se está a observar, é o reservatório de água entre as estufas que teve de ser corrigida através da eliminação de pontos e criação de superfícies (Figura 9.8).

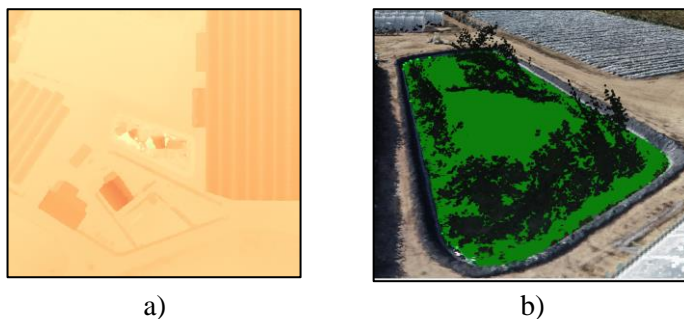


Figura 9.8 – Exemplo de correção de um reservatório de água. a) MDS antes da edição; b) Reservatório de água na nuvem de pontos

Outro exemplo interessante da utilização de superfícies será a edição dos telhados das estufas que apresentavam buracos nas estruturas (Figura 9.9). Estes dois exemplos comprovam que as superfícies refletoras originam ruído para a Fotogrametria.

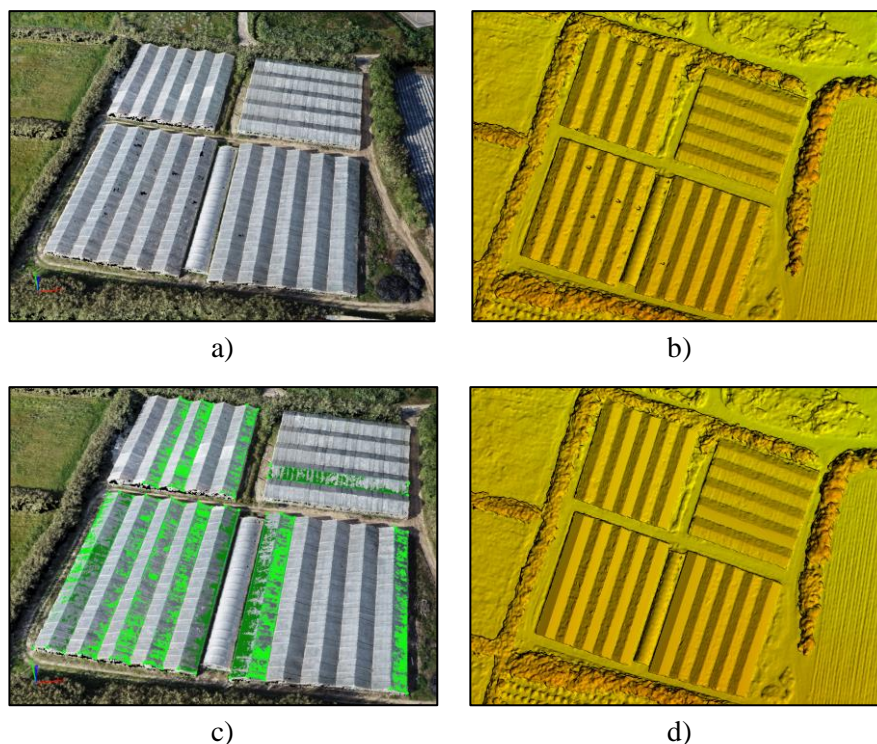


Figura 9.9 – Exemplo de correção dos telhados da estufa. a) Nuvem de pontos antes da aplicação das superfícies; b) aspeto do MDS antes da aplicação das superfícies; c) Aplicação das superfícies na nuvem de pontos; d) Aspeto do MDS após a aplicação das superfícies

Visto que os dois resultados são bastante idênticos e não é possível ver as diferenças com facilidade, optou-se por utilizar a ferramenta “*Raster Calculator*” do *ArcGIS*, subtraindo o MDS gerado após a edição da nuvem de pontos densa pelo MDS gerado antes da edição dessa mesma nuvem.

Os resultados são visíveis na Figura 9.10, onde é possível observar as principais mudanças ocorridas em diferentes escalas. Observando o mapa, chega-se à conclusão que as principais alterações foram referentes à eliminação do ruído em volta dos telhados e fachadas dos edifícios, visíveis nas secções 2, 3, 4 e 6 do mapa. É possível notar também nas secções 1, 3 e 6 que existem algumas formas irregulares, sendo estas alterações sobre vegetação. Como o processo teve de ser realizado nas duas nuvens de pontos, estas alterações foram resultado das interpolações que foram feitas para produzir o MDS, o que é compreensível em zonas de vegetação, com uma grande densidade de pontos e o facto de serem irregulares, que o resultado não seja sempre o mesmo iteração após iteração do processo. É possível observar com maior detalhe o exemplo do reservatório de água referido anteriormente na secção 4. Na secção 5, observa-se um exemplo claro da correção do ruído e dos buracos existentes na estufas, como foi referido antes. Por fim, nas secções 1 (a norte) e 6 (a este) é possível ver, no limite do projeto, que existem várias deformações. Isto acontece pela falta de fotografias, algo impossível de corrigir nas áreas muito próximas do limite.

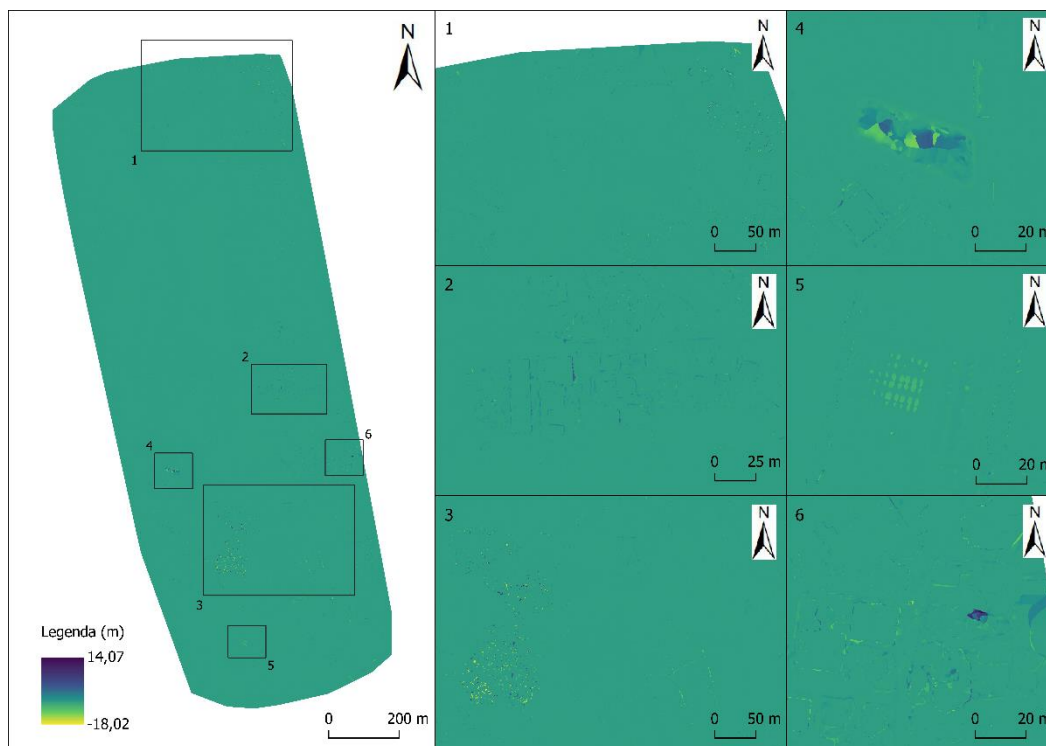


Figura 9.10 – Diferenças registadas entre os dois MDS.

9.4 Modelo Digital de Terreno e curvas de nível

A geração dos MDT é feita após o cálculo e geração do MDS. Desta forma, foram gerados dois MDT antes da edição da nuvem de pontos densificada – com a resolução de 50 cm e 2 m – e mais dois MDT, para as mesmas resoluções, após a edição da mesma.

Depois da geração de todos os MDT utilizou-se a ferramenta *Raster Calculator* para obter mapas com as diferenças entre os MDT antes e após a edição da nuvem de pontos densificada. Os resultados destes cálculos estão apresentados na Figura 9.11.

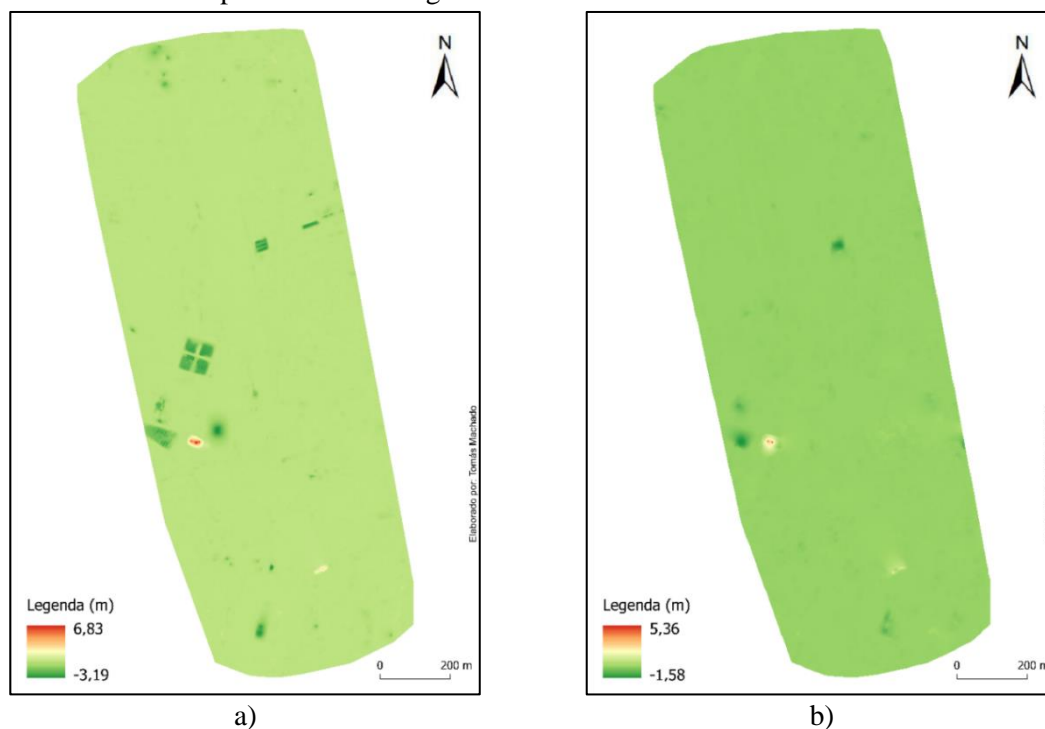


Figura 9.11 – Diferenças registadas entre MDT. a) Diferenças entre os MDT de 50 cm; b) Diferenças entre os MDT de 2 m.

Analisando a Figura 9.11 a) e b) são notórios os erros da classificação da nuvem de pontos densificada visíveis em elementos como estufas, o reservatório de água já referido, arbustos de maior elevação e edifícios que estavam a ser classificados como chão e/ou estrada. Em relação às diferenças registadas na Figura 9.11 b), seria expectável que existissem menos alterações, ou que estas não fossem tão acentuadas, devido à redução da resolução espacial.

As diferenças entre os dois MDT é também notória nas curvas de nível geradas a partir destes (Figura 9.12).

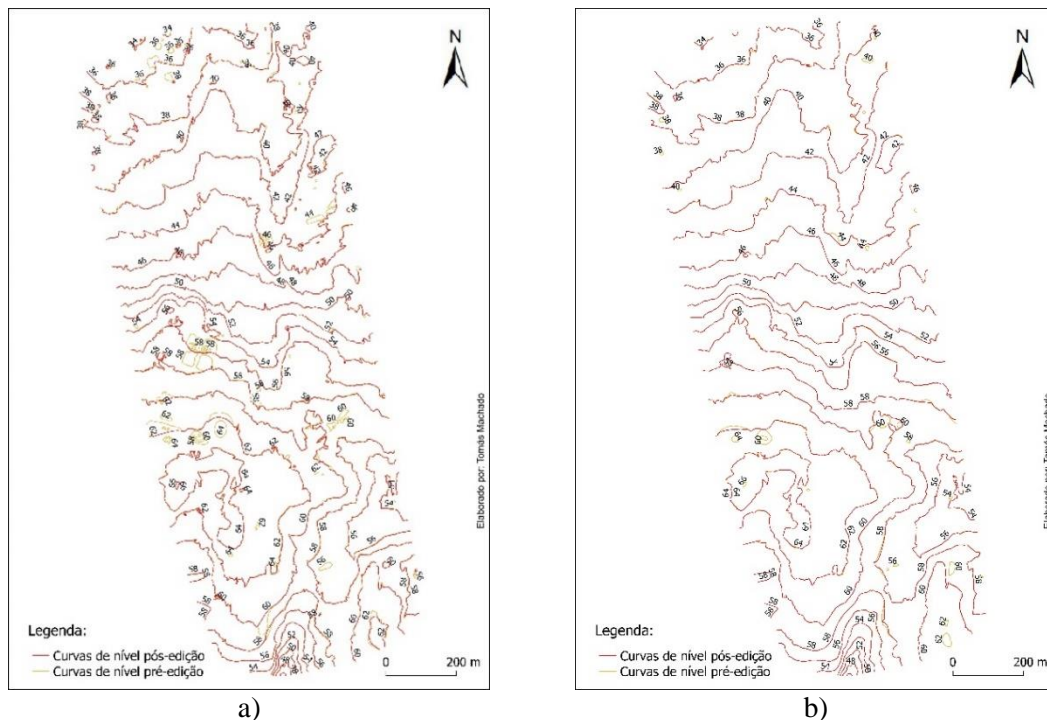


Figura 9.12 – Curvas de nível geradas para a partir dos MDT. a) Curvas de nível geradas a partir do MDT de 50 cm; b) Curvas de nível geradas a partir do MDT de 2m.

Em relação às curvas de nível resultantes dos MDT de 50 cm (Figura 9.12 a)), é possível observar que as curvas de nível geradas antes da edição da nuvem de pontos densificada apresentam alguns erros correspondentes às diferenças registadas na Figura 9.11 a) – estufas, edifícios e vegetação de maior dimensão. No que toca às curvas de nível obtidas após a edição da nuvem de pontos densificada, existe uma maior coerência entre as curvas de nível, bem como a ausência de curvas erradas existentes no MDT anterior. É de referir que as curvas de nível resultantes do segundo MDT foram editadas de forma a eliminar curvas de muito pequena dimensão e curvas que correspondessem a áreas de vegetação alta que tenham sido interpoladas pelo MDT.

Em relação às curvas de nível resultantes dos MDT de 2 m (Figura 9.12 b)) estas vêm a confirmar o que foi referido na Figura 9.11, as diferenças são mínimas entre os dois MDT, observando-se apenas a ausência de pequenas curvas de nível que correspondiam a elementos como vegetação de grande dimensão e alguns edifícios de maior extensão.

Na Figura 9.13 estão presentes os MDT após a edição das nuvens de pontos densificadas. Como é possível observar nenhum dos MDT apresenta erros ou elementos mencionados na análise à Figura 9.11 e considera-se que os MDT aproximam-se da altimetria real da área fotografada.

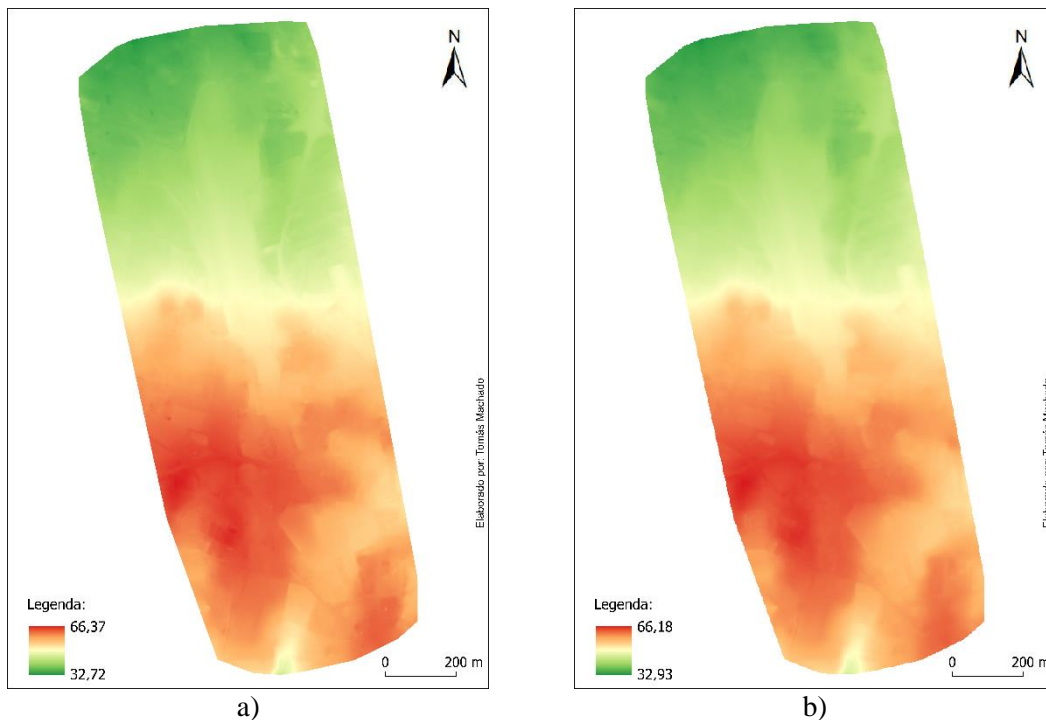


Figura 9.13 – MDT após edição das nuvens de pontos densificadas. a) MDT 50 cm; b) MDT 2 m.

9.4.1 Controlo de qualidade dos MDT e curvas de nível

Quanto ao controlo de qualidade dos MDT e das consequentes curvas de nível, as normas para a exatidão posicional absoluta altimétrica exigem que, para o Ndd1, para um MDT de resolução espacial de 2 metros, a exatidão altimétrica deve ser igual ou inferior a 45 cm. Para além da exatidão altimétrica total de $\pm 0,45$ m, existe ainda a condição de que, pelo menos, 90% dos pontos avaliados devem apresentar um desvio até $\pm 0,75$ m (como referido na secção 8.6). Para a avaliação da exatidão altimétrica para o MDT de 50 cm, como as normas não referem qualquer tipo de regras para outras resoluções espaciais para o Ndd1, foram adotados os valores de referência anteriormente referidos.

Para ambos os MDT foram avaliados 46 pontos bem distribuídos pela área de estudo provindos de levantamentos topográficos anteriores, como já referido na secção 8.6.

Depois de calculados os EMQ dos desvios altimétricos existentes entre o levantamento topográfico e os MDT, ambos obtiveram um valor de EMQ de exatidões posicionais altimétricas aceitáveis, aproximadamente $\pm 0,169$ m para o MDT com resolução espacial de 2 m e aproximadamente $\pm 0,127$ m para o MDT com resolução espacial de 50 cm. Para ambos os MDT, todos os pontos avaliados apresentavam desvios altimétricos inferiores a $\pm 0,75$ m, tendo o MDT de 2 m registado um desvio máximo de ± 48 cm e o MDT de 50 cm registado um desvio máximo de ± 40 cm.

A diferença do EMQ e a diminuição do mesmo entre os MDT já seria esperada. Esta diferença acontece devido à própria resolução espacial. O MDT com uma resolução espacial menor utiliza uma menor quantidade de cotas e mais afastadas entre si para efetuar a interpolação, cria menos células e com maior probabilidade de erro, por sua vez o MDT de resolução maior utiliza uma amostra mais densa para efetuar a interpolação das células, ou seja, a cota irá variar menos face à realidade. Esta mesma razão também explica o facto das curvas de nível serem diferentes (Figura 9.14). As curvas de nível resultantes do MDT com resolução espacial maior terão mais vértices e pormenores do que o MDT com uma resolução espacial menor.

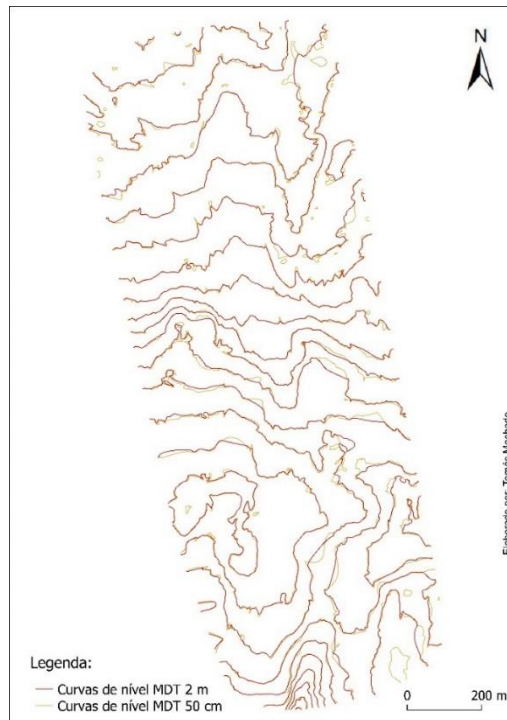


Figura 9.14 – Sobreposição das curvas de nível interpoladas a partir dos dois MDT.

Para homologação, estes MDTs devem ser cortados pela extensão da área de trabalho pela regra específica “RE3.6 – Área do MDT” – “Os pontos do “Modelo digital do terreno” com cota útil definem, pelo seu limite exterior, uma área que contenha na íntegra a “Área de trabalho”” (DGT, 2020) e todas as células fora da área de trabalho foram consideradas *NoData* com o valor de -999, de acordo com a regra específica “RE3.5 – Valores “void”” – “Os pontos da grelha que estão fora da “Área de trabalho” apresentam o valor de cota “-999” (DGT, 2020). Para isso, foi utilizada a ferramenta *Clip* (para entidades de tipo *raster*) e selecionou-se o MDT pretendido, em seguida a entidade que irá servir como base para o recorte, e selecionou-se a opção “*Use Input Features for Clipping Geometry*” para termos o MDT apenas da área de trabalho. Por fim, definiu-se os valores “*NoData*” como “-999”.

9.5 Ortofotomapa

Após a geração do MDS e do MDT é gerado o ortofotomapa através da junção das várias fotografias ortoretificadas de forma a criar uma representação ortogonal do terreno e dos objetos, um ortomosaico e adicionaram-se os elementos gráficos cartográficos. Chegou-se ao resultado presente na Figura 9.15.

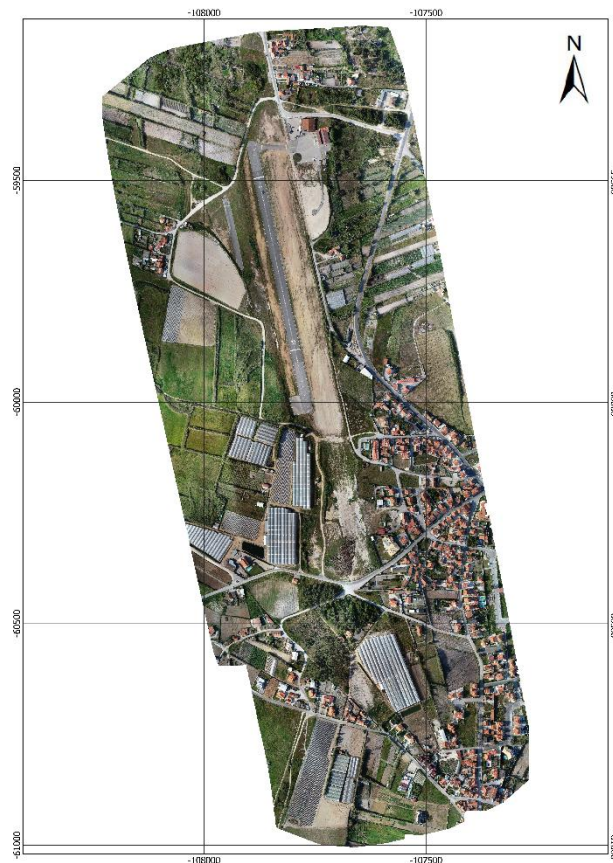


Figura 9.15 – Resultado final do ortofotomapa com 5 centímetros de resolução espacial.

Como referido na metodologia escolhida para o projeto do *Pix4D* e na apresentação dos resultados dos MDE, a edição e a retificação da nuvem de pontos densificada tinham como objetivo melhorar não só o rigor na geração dos MDE, como também garantir que o ortofoto apresentasse melhores resultados. Esta edição conseguiu melhorar alguns aspetos relacionados com deformações ocorridas nos telhados dos edifícios, através da reclassificação da nuvem de pontos e da criação de superfícies. As Figura 9.16, Figura 9.17 e Figura 9.18 ilustram alguns exemplos das edições feitas, apresentando o objeto na ortofoto sem edição (esquerda), a edição realizada (direita) e o mesmo objeto na nova ortofoto (baixo). A criação de superfícies foi feita apenas nos edifícios que apresentavam deformações mais evidentes na área de trabalho, devido à grande quantidade de elementos existentes.

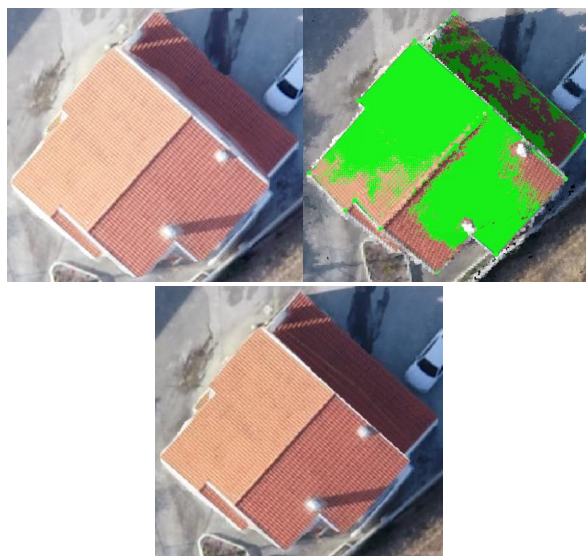


Figura 9.16 – Exemplo de edição da nuvem de pontos densificada e resultado na ortofoto (1).

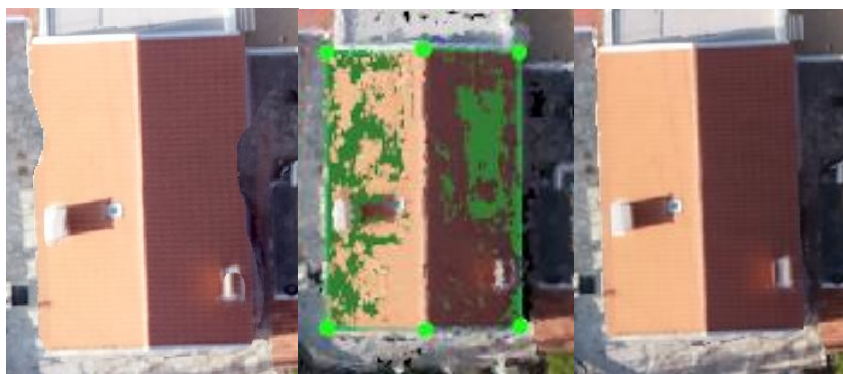


Figura 9.17 – Exemplo de edição da nuvem de pontos densificada e resultado na ortofoto (2).



Figura 9.18 – Exemplo de edição da nuvem de pontos densificada e resultado na ortofoto (3).

Como é possível observar nas figuras anteriores, esta edição conseguiu remover, ou reduzir, alguns aspetos relacionados com o ruído para lá dos telhados dos edifícios – como maior referência as Figura 9.16 e Figura 9.18 – conseguiu corrigir telhados que apresentavam deformações graves – como referência as Figura 9.16 e Figura 9.17 – e foi também possível corrigir deformações que tornavam o limite dos cantos dos telhados arredondados.

No entanto, esta edição não conseguiu eliminar por completo todas as deformações ocorridas principalmente nas zonas mais próximas do limite do projeto, na vegetação e a existência de ruído junto ao limite dos telhados (Figura 9.19). Estas deformações são essencialmente, no caso dos limites dos edifícios no limite do projeto, a deformação da forma dos objetos e a existência de texturas dos telhados para lá dos edifícios (Figura 9.19 a)). No caso da vegetação nota-se que algumas árvores não foram bem retificadas (Figura 9.19 b)). No caso das deformações ocorridas junto aos limites dos telhados, nem sempre foi possível eliminar essas deformações, notando-se na Figura 9.19 c) limites de telhados arredondados e texturas de telhados para lá dos edifícios.



Figura 9.19 – Exemplos de deformações ocorridas no ortofotomapa. a) Deformações no limite do projeto; b) Deformações ocorridas em vegetação; c) Deformações junto ao limite do telhado

A ocorrência destas deformações pode ser justificada pelas sobreposições escolhidas – para este projeto optou-se por 80% de sobreposição longitudinal por 60% de sobreposição lateral – pela existência de ruído impossível de corrigir que condiciona a geração do MDS – que serve de base para o ortofotomapa – e pela ausência da realização de voos cruzados.

9.5.1 Controlo de qualidade do ortofotomapa

Em relação ao controlo de qualidade da exatidão absoluta planimétrica da ortofoto, como referido na secção 8.6, para o Ndd1 a ortofoto deve ter uma resolução espacial de 10 centímetros ou, caso justificado, 5 centímetros de resolução e uma exatidão absoluta de 30 centímetros, ou menor, sendo que 90% de todos os pontos considerados devem apresentar desvios menores ou iguais a $\pm 0,45$ m.

Para o controlo de qualidade da ortofoto foram considerados 52 pontos marcados no chão. Após realizar as operações necessárias para o cálculo do EMQ, chegou-se ao valor de exatidão de $\pm 0,095$ m e 100% dos pontos comparados (em X e Y) registaram desvios abaixo de $\pm 0,45$ m, registando desvios máximos de $\pm 0,15$ m em X e $\pm 0,18$ m em Y. Este valor de EMQ vem a comprovar a excelente exatidão posicional da ortofoto e do levantamento dos PF para a realização do voo fotográfico.

9.6 Estereorrestituição

9.6.1 Área de trabalho

A área de trabalho está apresentada na Figura 9.20, esta contabiliza uma área total de 13.02 ha. Esta área de trabalho foi escolhida por conter uma diversidade de temas e entidades da cartografia topográfica.



Figura 9.20 – Representação da Área de trabalho, Tema Auxiliar.

Nesta área foi possível identificar e desenhar cerca de 20 classes de objetos pertencentes a 8 temas distintos, como demonstrado na Figura 9.21.

Durante a estereorrestituição foram desenhados cerca de 138 polígonos fechados, 359 linhas e 155 pontos, contabilizando um total de 652 objetos. No Anexo III, é fornecido um *layout* com todas as classes de objetos restituídas e projetadas sobre o ortomosaico. Também no Anexo IV é fornecida uma representação cartográfica da informação restituída, à exceção de elementos que se sobrepusessem (Mobiliário Urbano e Sinalização) e elementos que não sejam representados em cartas topográficas. Como à altura do projeto ainda não existiam normativas sobre a simbologia dos objetos, organização dos elementos da carta, entre outros elementos, elaborou-se essa representação cartográfica seguindo os bons princípios de design cartográfico.

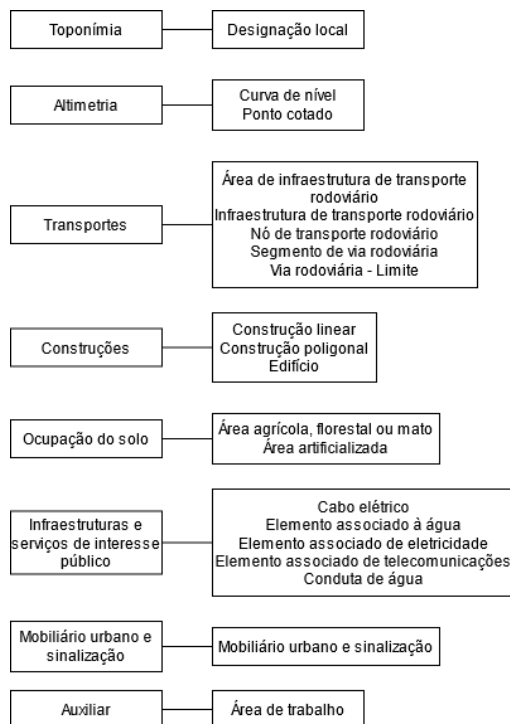


Figura 9.21 – Temas e classes de objetos identificáveis na área de trabalho.

9.6.2 Toponímia

O primeiro tema é referente à “Toponímia” que contém uma entidade: “Designação Local” (Figura 9.22). Este tema “corresponde ao ponto que identifica uma localização natural, artificial ou cultural do território, considerada relevante para a sua caracterização.” (DGT, 2020).



Figura 9.22 – Tema Toponímia.

Neste tema foi marcado um ponto no centro da Vila da Boavista de forma a identificar o território em que se está a trabalhar.

9.6.3 Altimetria

O segundo tema é a “Altimetria” (Figura 9.23), que tem como objetivo descrever a morfologia do terreno através das suas cotas (DGT, 2020). Nesta área de trabalho foi possível restituir interactivamente elementos das curvas de nível e pontos cotados. Quanto às curvas de nível, foram restituídas um total de 8, com cotas entre os 42 e os 56 m, contabilizando um total de sete curvas secundárias – 42, 44, 46, 48, 52, 54, 56 metros – e uma curva mestra – 50 m. Quanto aos pontos cotados foram restituídos um total de 66 pontos cotados. A restituição dos pontos cotados obedeceu a um espaçamento de aproximadamente 50 metros entre pontos. No entanto existem exceções: (1) caso o ponto se situe em cima de objetos, o ponto era marcado no terreno mais próximo; (2) se a localização do ponto coincidissem com uma curva de nível, ou muito próxima, esse ponto não seria considerado, passando ao seguinte; (3) a última exceção é relacionada com a regra específica “RE3.3 – Pontos cotados” que refere que tem de ser recolhido, pelo menos um ponto cotado em zonas planas em que a distância horizontal entre dois objetos “Curva de nível” excedam os 100 metros para o NdD1 (DGT, 2020).



Figura 9.23 – Tema altimetria.

Para ajudar a restituição destes elementos foi aplicada a ferramenta “*Snap to ground*” do *Photomod*. Esta ferramenta tem como objetivo obter as cotas do terreno através da correlação máxima dos *pixels* entre as fotografias em zonas correspondentes. Sendo que esta ferramenta se baseia na

correlação entre as imagens, tem um erro associado. Para evitar registrar pontos errados apenas eram marcados pontos com uma correlação acima dos 0.90 (90%).

De forma a perceber o erro associado a estes elementos compararam-se todos os vértices das curvas de nível (Figura 9.24) e todos os pontos cotados (Figura 9.25) com o MDT de maior resolução espacial permitida neste trabalho, o MDT de 50 cm, e são calculados o seu EMQ, a sua média e o seu desvio-padrão.

No que toca às curvas de nível, foram restituídos 690 pontos e foi feito um mapa²⁰ (Figura 9.24) para percebermos as diferenças de cota entre as curvas restituídas e o MDT.

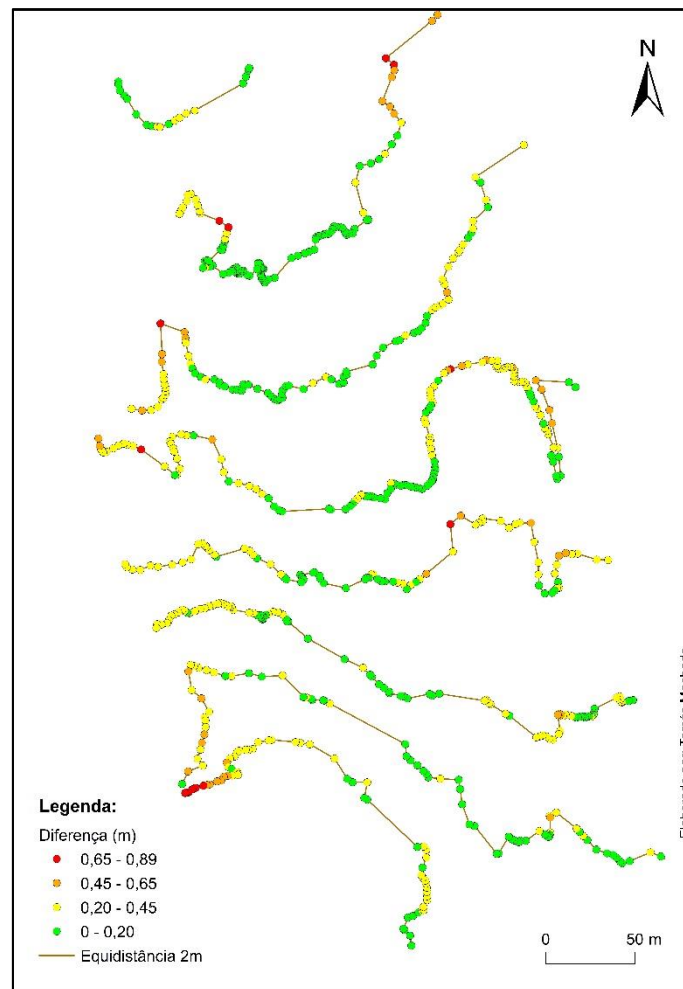


Figura 9.24 – Diferença de cotas entre as curvas restituídas e o MDT com resolução espacial de 50cm.

Analisando o mapa, é possível observar que os pontos restituídos perto dos limites da área do projeto apresentam, no geral, um erro maior em relação aos pontos restituídos na sua área central.

Por não ser possível avaliar a qualidade posicional altimétrica e planimétrica das curvas de nível e pontos cotados a partir de pontos coordenados por GPS, utilizou-se a metodologia mencionada na secção 8.6 para avaliar a qualidade posicional altimétrica destes elementos.

Para as curvas de nível foram avaliados um total de 690 pontos. Depois de calculado o EMQ dos desvios face ao MDT, foi registado um desvio de $\pm 0,275$ metros. No entanto este EMQ não pode

²⁰ Os valores das diferenças estão positivos para facilitar a simbologia do mapa, para os cálculos foram utilizados os seus valores reais.

ser estimador da qualidade posicional destes pontos pelo facto de estimar o desvio entre os pontos e o MDT e não os desvios entre os pontos e o terreno.

Depois de aplicada a fórmula fornecida na secção 8.6 – lei da propagação dos erros aleatórios (equação (8.3) – chegou-se a um EMQ de aproximadamente ± 0.303 metros e mais de 90% (cerca de 657 dos 690) dos pontos avaliados (depois de somado o EMQ do MDT aos desvios) registaram desvios inferiores a ± 0.65 metros, como previsto nas normas de referência da DGT.

Quanto aos pontos cotados, foram restituídos um total de 67 pontos e foi feito um mapa²⁴ (Figura 9.25) semelhante ao anterior para perceber as diferenças de cota entre os pontos cotados e o MDT.

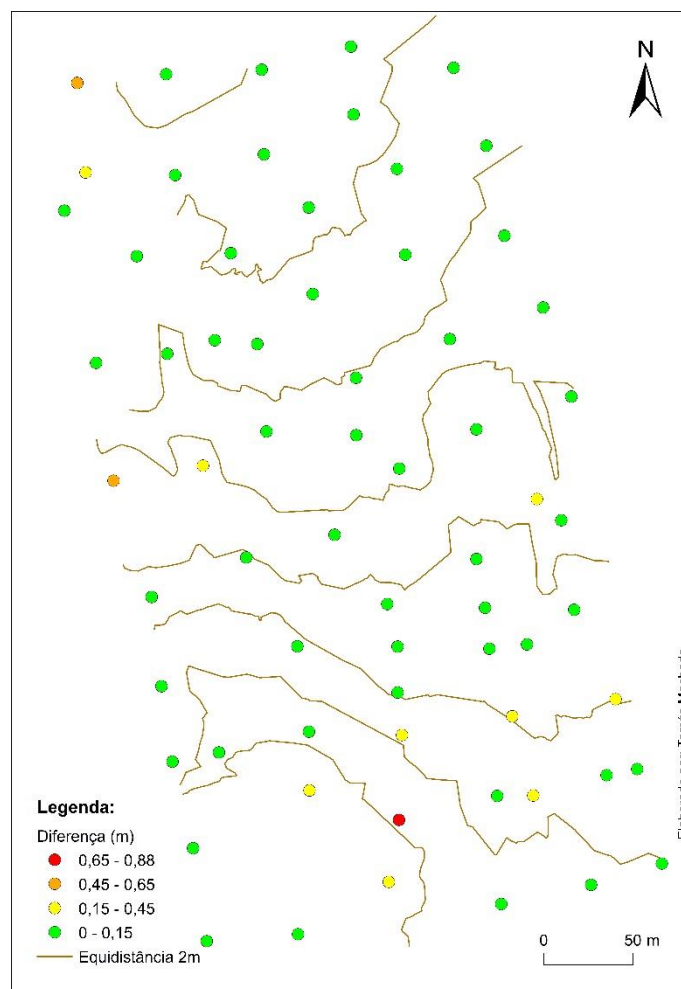


Figura 9.25 – Diferença de cotas entre os pontos cotados restituídos e o MDT com resolução espacial de 50cm.

Ao analisar este mapa, pode-se observar que os desvios de cota dos pontos cotados parece já não ser afetada pelos limites do projeto.

Para o controlo de qualidade dos pontos cotados utilizou-se a metodologia anteriormente referida. Assim o EMQ entre os pontos e o MDT foi de aproximadamente $\pm 0,171$ metros e o EMQ dos pontos face ao terreno registou um desvio de aproximadamente $\pm 0,213$ metros. Quanto à quantificação dos desvios, cerca de 97% (65 pontos) dos pontos avaliados registaram desvios inferiores a $\pm 0,65$ metros, respeitando assim as normas da DGT.

Estes resultados vieram a comprovar a informação visual presente nas Figura 9.24 e Figura 9.25, as curvas de nível obtiveram desvios maiores em relação aos pontos cotados.

9.6.4 Transportes

Quanto ao tema dos “Transportes” (Figura 9.26) foram desenhados objetos relativos aos segmentos de via rodoviária, limites da linha rodoviária, nós pertencentes às vias, nomeadamente nós de junção, fim de rodovia e infraestrutura e foi possível restituir uma infraestrutura rodoviária e o seu nó, pertencentes a um parque de estacionamento. Pode-se verificar que as vias rodoviárias a sudoeste não se encontram interligadas. Esta falta de ligação entre estas vias – e outras que se encontrem incompletas – deve-se ao facto destas vias estarem no limite da área de trabalho e, devido à limitação de fotografias do *Photomod*, não existirem fotos para restituir essas áreas.

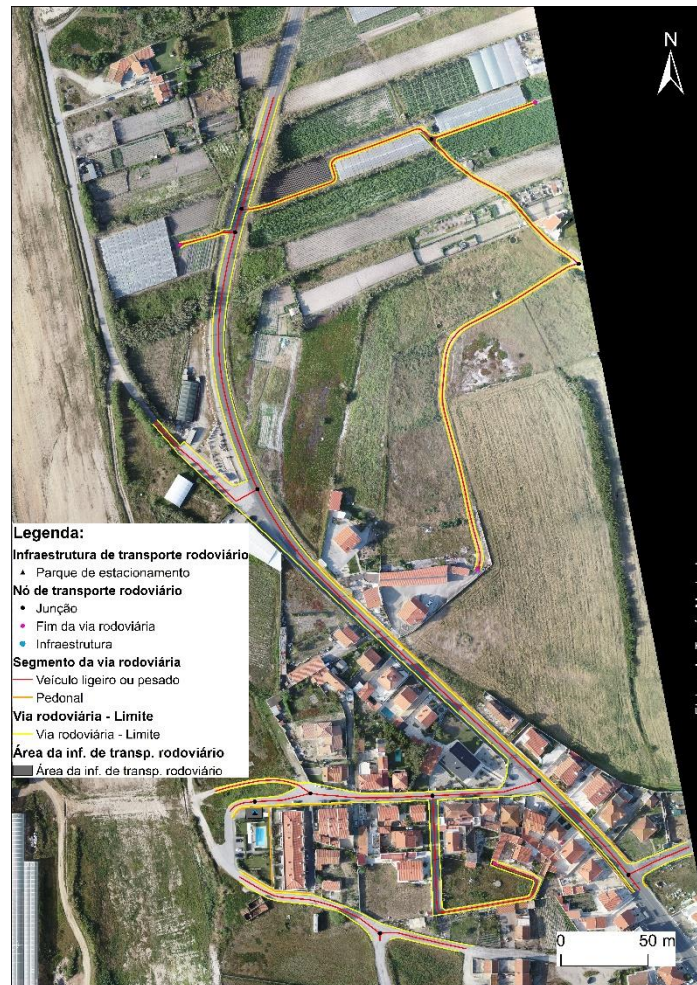


Figura 9.26 – Tema Transportes.

Neste tema existe uma classe de objetos que não tem geometria. É uma tabela que contém informações adicionais sobre as vias rodoviárias – segmentos de via e limites de via – com o nome das vias, a data em que a via foi registada no catálogo de vias rodoviárias, a fonte de aquisição e os códigos das vias nos diferentes catálogos. Esta informação pode ser retirada dos catálogos das vias rodoviárias da DGT, mencionado também nas normas, ou, no caso dessas vias não estarem catalogadas, retirar doutras fontes e atribuir os códigos específicos para esses casos, respeitando as regras específicas “RE5.5.11 - Atribuição do código da via rodoviária” e “RE5.5.12 - Atribuição do nome e dos restantes atributos da via rodoviária”. De acordo com esta, se as vias não estiverem catalogadas deve-se atribuir o código 996 “quando a via corresponde a uma estrada europeia, autoestrada, itinerário principal, itinerário complementar, estrada nacional, estrada regional, estrada municipal, caminho municipal, estrada florestal, caminho florestal ou ciclovía” (DGT, 2020) e o código 997 “quando a via corresponde a uma via rodoviária num arruamento” (DGT, 2020).

No caso deste trabalho, ambos os catálogos da DGT não tinham qualquer via catalogada para esta área de estudo e ao pesquisar nos catálogos por concelho, não existiam registos para o concelho de Torres Vedras, sendo necessário criar uma tabela de raiz e utilizar os códigos especificados nas regras anteriormente referidas (Figura 9.27).

Identific	inicioObj	fimObj	codigoVia	dataCat	fonteAqui	nome	nomeAlternativo	tipoViaRodovAbv	tipoViaRodovC	tipoViaRodovD
0			997	04/02/2021 15:45	Google				997	997
1			996	04/02/2021 15:45	Google	Estrada nacional 247	N247		996	996
2			997	04/02/2021 15:45	Google	Rua do Alecrim	Rua do Alecrim		997	997
3			997	04/02/2021 15:45	Google	Travessa do Alecrim	Travessa do Alecrim		997	997
4			997	04/02/2021 15:45	Google	Rua dos Gigantes	Rua dos Gigantes		997	997
5			997	04/02/2021 15:45	Google	Travessa dos três irmãos	Travessa dos três irmãos		997	997
6			997	04/02/2021 15:45	Google	Rua Quinta da Torre	Rua Quinta da Torre		997	997

Figura 9.27 – Tabela ViaRodov.

Como referido na secção 8.5, neste tema foi necessário criar 4 classes de relação entre as classes SegViaRodov e ViaRodov (ligacaoSegViaRodovViaRodov), SegViaRodov e ViaRodovLimite (ligacaoSegViaRodovViaRodovLimite), AreaInfraTransRodov e InfraTransRodov (ligacaoAreaInfraTransRodovInfraTransRodov) e entre as classes InfraTransRodov e noTransRodov (ligacaoInfraTransRodovNoTransRodov), seguindo a metodologia descrita.

9.6.5 Construções

De seguida temos o tema das “Construções”. Foi possível identificar três classes: “Construção Linear”, “Construção Poligonal” e “Edifício”. Este tema tem como objetivo representar construções que caracterizam o território englobando edifícios, muros, limites de construções lineares, piscinas, entre outros (DGT, 2020).



Figura 9.28 – Tema Construções.

Como é possível observar na Figura 9.28, foi possível reconhecer objetos correspondentes a muros de alvenaria ou betão, sebes, gradeamentos ou vedações e os respetivos portões nas construções lineares; piscinas e os limites das construções lineares nas construções poligonais; e barracas, estufas e telheiros na entidade referente aos edifícios. Como já foi referido anteriormente, a limitação de fotografias no *software Photomod 5 Lite*, a não realização de voos cruzados e o facto da câmara estar num ângulo vertical tiveram implicações na restituição de alguns objetos.

Estas implicações sentiram-se na restituição dos edifícios. De acordo com as normas, a definição da geometria dos edifícios, para o NdD1, tem de ser feita pela sua implantação. Como nem sempre era possível aceder a todas as fachadas dos edifícios, a restituição foi feita pelas beiras dos telhados, quando era possível representar o edifício apenas pelo telhado, ou utilizando o método “Combinado”, ou seja, a “geometria horizontal foi obtida a partir da combinação das geometrias das suas partes constituintes com as geometrias das partes do edifício utilizando diferentes referências de geometria horizontal.” (DGT, 2020).

Como referido na secção 8.6, devido ao estado atual da pandemia do SARS-COV-2 e numa tentativa de evitar contactos e interferir com a privacidade dos moradores, não foram levantados pontos GPS das coordenadas reais da implantação dos edifícios para o controlo de qualidade. No entanto, caso se tivesse feito esse levantamento, seriam esperados desvios entre a restituição dos edifícios e o levantamento GPS. Assim sendo, foi necessário calcular o Erro de Graticismo (EG) – distância mínima que é possível desenhar, ou distinguir, dois pontos – de forma a saber a que escala é que a diferença entre a largura dos beirais e a implantação dos edifícios não afete a precisão da cartografia.

(9.1)

$$EG = 0.2 \text{ mm} * N$$

O EG assume um valor base de 0.2 m na carta gráfica. Se multiplicarmos o EG pelo módulo da escala da carta (N) obtemos o valor de tolerância para a largura dos beirais. Não tendo sido possível a medição da largura dos beirais, assumiu-se uma largura entre os 30 cm e os 40 cm. Tendo estas medidas como referência, depois de calculada a tolerância do EG, chegou-se à conclusão que para as escalas 1:1500 e 1:2000 a tolerância seria de 30 cm e 40 cm, respetivamente. Desta forma admite-se que esta cartografia pode ser utilizada até à escala 1:2000 sem que a restituição dos edifícios pelo contorno do telhado afecte a sua representação cartográfica. Para a utilização desta cartografia para escalas maiores, seria necessário realizar o recuo dos beirais em fase de edição (para o que era necessário ter a informação da largura real dos beirais), ou proceder a um levantamento topográfico tradicional.

9.6.6 Ocupação do solo

O tema “Ocupação do solo” (Figura 9.29) está dividido em “Área agrícola, florestal ou mato” e “Área artificializada” e tem como objetivo fornecer informação útil para a compreensão do território (DGT, 2020).

Nesta área de trabalho foi possível interpretar três classes de áreas agrícolas, florestais e matos, nomeadamente: Agricultura, Vegetação herbácea natural e Sistema agroflorestal. Quanto às áreas artificializadas, foram interpretadas duas áreas de equipamentos comerciais ou de carácter geral.



Figura 9.29 – Tema Ocupação do solo.

9.6.7 Infraestruturas e Serviços de Interesse Público

Quanto ao tema das “Infraestruturas e Serviços de Interesse Público” (Figura 9.30) foi possível identificar objetos relacionados com elementos associados à água – poços e câmaras de visita; elementos associados à eletricidade – apoios de iluminação e baixa tensão e apoios de baixa tensão; elementos associados a telecomunicações – postes telefónicos; cabos elétricos – cabos elétricos de baixa tensão; e condutas de água – valetas.

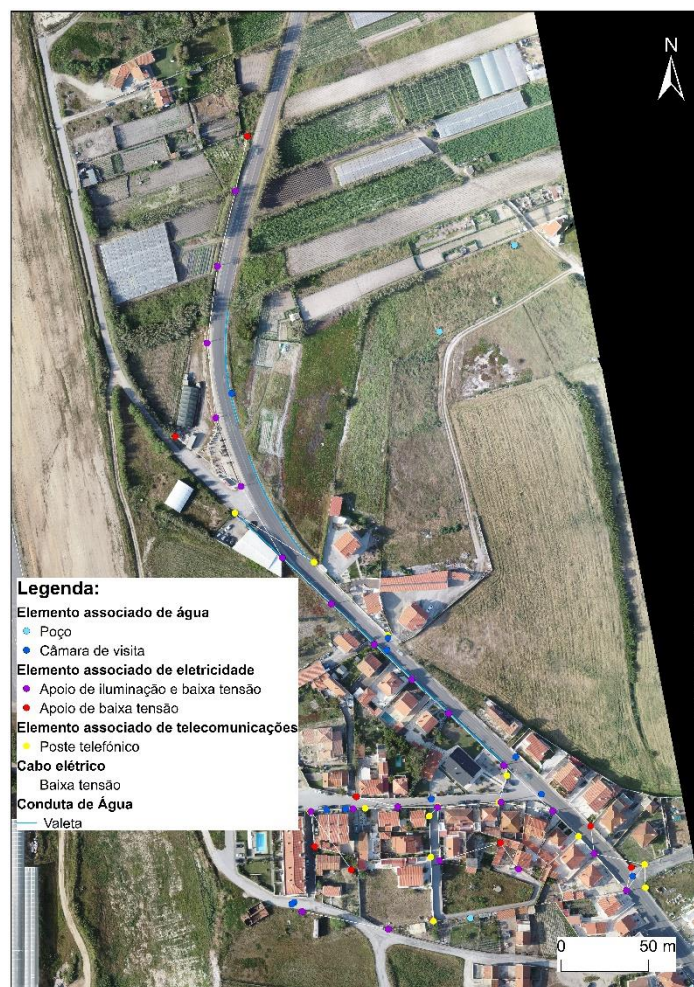


Figura 9.30 – Tema Infraestruturas e serviços de interesse público.

Os poços e as câmaras de visita foram materializados pelo seu centro.

No caso dos apoios de iluminação e baixa tensão, apoios de baixa tensão e postes telefónicos, estes foram restituídos pela sua base. A sua identificação foi feita tendo por base as fotografias aéreas e imagens *street view* do *software Google Earth*. A identificação de apoios de iluminação e baixa tensão é fácil pela presença da iluminação. No entanto a identificação dos apoios de baixa tensão e postes telefónicos era muito difícil, em alguns casos até impossível, de distinguir. Os postes telefónicos distinguem-se dos apoios de baixa tensão pelo seu suporte: os primeiros têm, em geral, um poste em madeira, enquanto que os segundos têm um poste de betão. A única maneira de fazer a distinção entre ambos era indo ao terreno, algo difícil em altura de pandemia devido ao SARS-CoV-2, ou utilizando a funcionalidade *street view* do *Google Earth*.

Por fim, em relação aos cabos elétricos, estes foram identificados como sendo de baixa tensão por estarem situados no meio de uma localidade e pelas características dos seus apoios. A ligação entre os cabos e os seus apoios foram feitos através da ferramenta de *snap* do *Photomod* e as suas ligações foram feitas tendo também por base as fotografias do *street view*, porque estes são impercetíveis nas fotografias aéreas.

9.6.8 Mobiliário Urbano e Sinalização

O último tema é o “Mobiliário Urbano e Sinalização” (Figura 9.31). Este tema representa objetos presentes nas áreas urbanas que permitem o funcionamento dos equipamentos e infraestruturas urbanas (DGT, 2020).

Foi possível identificar três entidades deste tema: contentores do lixo, ecopontos e sinais de trânsito.

Os sinais de trânsito desta área em particular estão localizados sobre postes elétricos, pelo que a sua identificação passou também pela utilização da funcionalidade *street view* e foram marcados na base desses mesmos postes.

No caso dos contentores e dos ecopontos, estes foram marcados pelo seu centro. Como são elementos de dimensão 2D, a cota desses pontos não é considerada, podendo ser marcados pelo seu centro, ou topo do objeto.



Figura 9.31 – Tema Mobiliário e sinalização.

9.6.9 Controlo de qualidade da informação restituída

Depois de apresentados e discutidos os resultados da restituição, é altura de avaliar a sua exatidão absoluta altimétrica e planimétrica.

Em relação à exatidão altimétrica dos dados, para o Ndd1, o EMQ deve ser igual ou inferior a ± 0.40 metros e pelo menos 90% dos pontos comparados devem apresentar desvios iguais ou inferiores a ± 0.65 m. Para esta avaliação foram considerados 28 pontos. Depois de calculado o EMQ, chegou-se a um valor de exatidão posicional absoluta altimétrica de $\pm 0,084$ m e 100% dos pontos registaram desvios abaixo dos ± 0.65 m, tendo sido o maior desvio igual a ± 0.17 m.

No que toca à exatidão absoluta planimétrica as normas definem que, para o Ndd1, o EMQ deve ser igual ou inferior a ± 0.30 m e que pelo menos 90% dos pontos tenham desvios iguais ou inferiores a ± 0.45 metros. Para esta avaliação foram considerados 48 pontos. Depois de calculado o

EMQ para a planimetria dos dados restituídos, chegou-se ao valor de exatidão absoluta planimétrica de ± 0.115 metros em que 100% dos pontos apresentaram desvios inferiores a 0.45 m tendo sido o máximo de ± 0.23 m em X e ± 0.19 m em Y.

10. Considerações finais

O principal objetivo deste trabalho contempla a utilização de UAS para a obtenção de fotografias aéreas e a aplicação de métodos de Fotogrametria Digital e produção de Cartografia para homologação. Este trabalho pode ser dividido em 5 fases, a primeira fase correspondeu à elaboração do plano de voo para o levantamento fotográfico, definição do apoio topográfico e autorizações necessárias para realizar o voo; uma segunda fase com o reconhecimento da área a fotografar, marcação e levantamento do apoio topográfico e a realização do voo fotográfico; a terceira fase contemplou o processamento das fotografias resultantes do voo em *software Pix4D Mapper* para a obtenção da georreferenciação e dos produtos geoespaciais nuvem de pontos, *3D Mesh*, MDS, MDT e ortofotomapa; na quarta fase, foi definida uma área de trabalho, foram selecionadas e orientadas as fotografias correspondentes e procedeu-se à sua estereorrestituição em *software Photomod 5 Lite*; e por fim, na quinta fase procedeu-se ao controlo de qualidade de todos os produtos obtidos, tendo sido necessário realizar um levantamento de pontos no terreno com GPS para esse efeito.

Para a obtenção das fotografias foi feito um plano de voo que consistia numa área de 87 hectares. Neste plano definiram-se as sobreposições de 80% longitudinal e 60% lateral com o ângulo da câmara no *nadir* e foram levantados 20 PF. No total obtiveram-se 1030 fotografias das quais apenas foram utilizadas 727 como *input* no *software Pix4D Mapper*.

Com o processamento inicial das fotografias realizado pelo Pix4D foi possível obter uma visão geral da qualidade do voo e do apoio topográfico e recuperar as orientações interna e externa das fotografias. No final desse processo conclui-se que o voo registou boas sobreposições de fotografias e que o apoio topográfico contribuiu positivamente para o ajuste da orientação e posição das fotografias na aerotriangulação.

Um dos objetivos deste trabalho era verificar se a edição da nuvem de pontos densificada teria influência nos produtos finais. Para isso fizeram-se dois projetos no *Pix4D*, um sem qualquer tipo de edição ou reclassificação da nuvem de pontos e outro com a respetiva edição – através de eliminação de pontos e/ou criação de superfícies – e reclassificação da nuvem de pontos.

No que toca à influência desta edição na *3D Mesh*, concluiu-se que a reclassificação e adição de superfícies não originou grandes diferenças entre os resultados inicial e final. Ambos os produtos apresentavam texturas dos telhados com aspeto irrealista, continuavam a existir deformações nas fachadas dos edifícios, em muros e na vegetação. Para obter melhores resultados seria prudente realizar voos de menor altitude, voos cruzados, voos oblíquos, realizar um apoio topográfico mais denso e, caso o objetivo fosse um modelo 3D com um nível de detalhe grande, fazer um levantamento fotográfico terrestre. Neste caso a *3D Mesh* não necessitava desse nível de detalhe e, apesar das deformações existentes, é possível distinguir grande parte dos elementos presentes na área fotografada e ter uma visão geral do território.

Em relação aos MDE e curvas de nível resultantes, a edição e reclassificação da nuvem de pontos foi de grande importância.

No MDS esta edição foi importante para remover grande parte do ruído existente na nuvem e dar uma forma mais realista aos edifícios vistos de cima e na correção dos buracos existentes nas estufas. Neste produto a criação de superfícies e eliminação de pontos de ruído influencia fortemente o produto

final, visto que o MDS representa todos os elementos ao nível do solo e acima, não importando as classes.

No que toca aos MDT, foram criados dois MDT de resoluções diferentes (50 cm e 2 m) e as respetivas curvas de nível. Ao contrário do MDS, o MDT é mais influenciado pela reclassificação da nuvem de pontos, pois o modelo vai utilizar apenas as classes relativas ao “Solo” e “estradas”. Como seria de esperar, o MDT de maior resolução apresentou mais erros de classificação, que o MDT de resolução menor, existindo confusão entre as classes dos edifícios e a estrada e vegetação com o solo. Estes erros também ocorriam nas curvas de nível de cada MDT. Depois da reclassificação das nuvens de pontos densificadas, conseguiram-se corrigir os erros existentes nos MDT e nas curvas de nível.

Por fim, sendo a ortofoto um produto resultante do MDS, as correções efetuadas para o MDS fizeram-se sentir no resultado final da ortofoto, corrigindo formas de edifícios e removendo algum ruído. No entanto, não foi possível obter uma ortofoto perfeita, continuaram a existir algumas deformações no limite dos edifícios e muros. Para obter melhores resultados sugere-se a realização de voos com maior sobreposição de fotografias, efetuar voos cruzados e a utilização de outro *software* especializado na geração de ortofotos.

Outro objetivo deste trabalho era aplicar técnicas de estereorrestituição para produzir cartografia preparada para homologação. Assim, foi possível restituir 8 temas: Área de trabalho, Toponímia, Altimetria, Transportes, Construções, Ocupação de solo, Infraestruturas e serviços de interesse público e Mobiliário urbano e sinalização. A estereorrestituição teve dificuldades nos edifícios devido à (1) limitação de fotografias permitidas num projeto do *Photomod 5 Lite* (45 fotografias), (2) à dificuldade, ou por vezes a impossibilidade, de desenhar objetos no seu todo em zonas próximas do limite da área de trabalho, e (3) a dificuldade em restituir edifícios quando não era possível ver todas as fachadas, devido à falta de fotografias.

Depois de obtidos os produtos pretendidos foi feito o seu controlo de qualidade. Este controlo de qualidade foi feito através do cálculo do EMQ numa amostra de pontos.

Quanto ao controlo de qualidade da exatidão posicional absoluta altimétrica dos MDT e curvas de nível obtidas pelo *Pix4D*, foi possível obter bons resultados em ambos, ± 0.126 m para o MDT de 50 cm de resolução e ± 0.168 m para o MDT de 2 m de resolução.

O controlo de qualidade da exatidão posicional absoluta planimétrica da ortofoto registou um EMQ de ± 0.095 m.

Quanto ao controlo de qualidade da restituição, foi feito o controlo de qualidade da sua altimetria e planimetria. No controlo de qualidade da altimetria, foram comparados pontos no limite das vias e caixas de visita. Por sua vez, no controlo de qualidade da planimetria foram avaliados todos os pontos utilizados para a altimetria e pontos nas esquinas de muros. Depois de calculados os EMQ, registaram-se ± 0.084 m na exatidão altimétrica e ± 0.115 m na exatidão planimétrica.

Para além do controlo de qualidade da planimetria e altimetria da restituição, fez-se um controlo de qualidade específico para as curvas de nível e pontos cotados, ambos restituídos interativamente, comparando com o MDT de maior resolução espacial e aplicando depois a lei da propagação dos erros aleatórios para estimar o desvio existente entre a restituição e o terreno. Depois de feitos os cálculos, os vértices das curvas de nível restituídas obtiveram um EMQ de ± 0.303 m e os pontos cotados obtiveram um EMQ de ± 0.213 m.

Ao ser calculado o EMQ das curvas de nível obtidas de forma automática e as obtidas por estereorrestituição podemos concluir que tanto a utilização das curvas de nível obtidas automaticamente

como a utilização de curvas de nível restituídas interactivamente é viável para fins de homologação. Em relação aos pontos cotados, estes também são viáveis de se utilizar para fins de homologação.

No final de todo o processo conclui-se que todos os objetivos foram atingidos, a utilização de UAS para a Fotogrametria Digital e produção de cartografia para homologação é viável para altitudes até 120 metros.

Para estudos futuros, aconselha-se o estudo desta mesma temática para altitudes acima dos 120 m, que resultarão em menor quantidade de fotografias pelo que se tornará mais económico em termos de tempo.

11. Referências bibliográficas

- Aber, J. S., Aber, S. W., & Pavri, F. (2002). Unmanned small-format aerial photography from kites for acquiring large-scale , high resolution , multiview-angle imagery. *International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Autoridade Nacional da Aviação Civil (ANAC) (2016). Regulamento n.º 1093/2016 da Autoridade Nacional da Aviação Civil. Diário da República n.º 238/2016, Série II de 2016-12-14. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2006.01.003>.
- Assembleia da República (1995). Decreto-Lei n.º 48/95 do Ministério da Justiça. Diário da República n.º 63/1995, Série I-A de 1995-03-15. <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/48/1995/03/15/p/dre/pt/html>.
- Assembleia da República (2018). Decreto-Lei n.º 58/2018 de 23 de julho da Assembleia da República. Diário da República I Série. N.º 140, 3679-3684. <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/58/2018/07/23/p/dre/pt/html>.
- Brito, J., & Coelho, L. (2002). *Fotogrametria Digital* (2nd ed.). Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- Bryson, M., Johnson-Roberson, M., Murphy, R. J., & Bongiorno, D. (2013). Kite Aerial Photography for Low-Cost, Ultra-high Spatial Resolution Multi-Spectral Mapping of Intertidal Landscapes. *PLoS ONE*, 8(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073550>.
- Casaca, J., Matos, J., & Baio, M. (2005). *Topografia Geral* (E. Lidel (ed.); 7ª Edição).
- Celikoyan, T. M., Altan, M. O., Kemper, G., & Toz, G. (2003). *Evaluation of a theatre by using low-altitude aerial and terrestrial photogrammetry*. 34.
- Comissão Europeia (2012). Regulamento de Execução (UE) N. o 923/2012 da Comissão, Jornal Oficial da União Europeia, L 281, 13 de outubro de 2012. https://doi.org/10.3000/19770774.L_2012.281.por.
- Comissão Europeia (2019). Regulamento Delegado (UE) 2019/945 da Comissão, Jornal Oficial da União Europeia, L 152, 11 de junho de 2019. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2019/945/oj.
- Comissão Europeia (2019a). Regulamento de Execução (UE) 2019/947 Da Comissão, Jornal Oficial da União Europeia, L 152, 11 de junho de 2019. http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2019/947/oj.
- Comissão Europeia (2020). Regulamento de Execução (UE) 2020/639 da Comissão, Jornal Oficial da União Europeia, L 150, 13 de maio de 2020. http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2020/639/oj.
- Comissão Europeia (2020a). Regulamento de Execução (UE) 2020/746 da Comissão, Jornal Oficial da União Europeia, L 176, 5 de junho de 2020. http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2020/746/oj.
- Comissão Europeia (2020b). Regulamento Delegado (UE) 2020/1058 da Comissão. (2020b). Jornal Oficial da União Europeia, L 232, 20 de julho de 2020. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2020/1058/oj.
- DGT. (2020). *Normas e especificações técnicas para a cartografia topográfica vetorial e de imagem*.
- Diário do Governo (1947). Decreto-Lei no. 36:158 do Ministério dos Negócios Estrangeiros, Diário do Governo n.º 39/1947, Série I de 1947-02-17. <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/36158/1947/02/17/p/dre/pt/html>.
- DJI (2021). 29/09/2021. https://www.dji.com/pt/phantom-4-pro?site=brandsite&from=mobile_nav.
- DroneDeploy (2021). How Do I Use Ground Control Points?. 29/09/2021. <https://www.dronedeploy.com/blog/what-are-ground-control-points-gcps/>.
- Durand, M. T., Li, D., Wigmore, O., Vanderjagt, B. J., Molotch, N. P., & Bales, R. C. (2016). Catchment-scale snow depth monitoring with balloon photogrammetry. *AGU Fall Meeting Abstracts*. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016AGUFM.C51C0669D>.
- Eck, C. (2001). *Navigation Algorithms with Applications to Unmanned Helicopters* [Tese de

- Doutoramento, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland]. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010782581>.
- Eisenbeiss, H. (2004). *A Mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV): System Overview and Image Acquisition*. https://www.researchgate.net/publication/228788846_A_mini_unmanned_aerial_vehicle_UAV_system_overview_and_image_acquisition.
- Eisenbeiss, H. (2009). *UAV Photogrammetry* [Tese de Doutoramento, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland]. <https://doi.org/110.3929/ethz-a-005939264>.
- ESRI (2021). 29/09/2021. <https://www.esri.com/en-us/home>.
- Filipe, M. J. do C. (2012). *A fotogrametria aérea como ferramenta na restituição de paisagens submersas por albufeiras* [Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa]. <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/9009>.
- Gallay, M., Eck, C., Zraggen, C., Kanuk, J., & Dvorný, E. (2016). High resolution airborne laser scanning and hyperspectral imaging with a small UAV platform. *ISPRS - International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B1*, 823–827. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-823-2016>.
- GoogleEarth (2021). 29/09/2021. <https://earth.google.com/web/@0,0,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r>.
- Instituto Nacional de Estatística (INE) (2011). Census 2011. https://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=censos2011_apresentacao.
- INSPIRE (2021). *About INSPIRE*. 29/09/2021. <https://inspire.ec.europa.eu/about-inspire/563>.
- Jizhou, W., Zongjian, L., & Chengming, L. I. (2004). Reconstruction of Buildings From a Single Uav Image. *ISPRS - International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 16*.
- Kim, H., Son, H., Kim, C. (2019). Digital Terrain Modeling Using AKAZE Features Derived. *36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2019, 1091-1097*. <https://doi.org/10.22260/ISARC2019/0145>.
- from UAV-Acquired, Nadir and Oblique Images.*
- Loch, C., & Lapolli, E. M. (1998). *Elementos Básicos da Fogrametria e Sua Utilização Prática* (4th ed.). Universidade Federal de Santa Catarina.
- Lourenço, J. de J. G. M. (2017). *Etapas e Metodologias de Produção de Ortofotomapas Digitais* [Instituto de Geografia e Ordenamento do Território]. https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/30486/1/TM_igotul009647.pdf.
- Luukkonen, T. (2011). *Modelling and control of quadcopter*. Aalto University.
- Matias, G. (2016). *Critérios da regulamentação-base aplicável à operação das aeronaves não tripuladas (drones) em espaço aéreo nacional* [Tese de Mestrado, Instituto Superior de Educação e Ciências]. <http://hdl.handle.net/10400.26/17364>.
- Miyatsuka, Y. (1996). Archaeological real-time photogrammetric system using digital still camera. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXI(B5)*, 374–377. <https://www.isprs.org/proceedings/XXXI/congress/part5/>.
- Nagai, M., Shibasaki, R., Manandhar, D., & Zhao, H. (2004). Development of Digital Surface Model and Feature Extraction By Integrating Laser Scanner and Ccd Sensor With Imu. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. https://www.researchgate.net/publication/2949748_Development_of_Digital_Surface_Model_And_Feature_Extraction_By_by_Integrating_Laser_Scanner_and_CCD_Sensor_with_IMU.
- Noureldin, A., El-Shafie, A., & Bayoumi, M. (2010). GPS/INS integration utilizing dynamic neural

- networks for vehicular navigation. *Information Fusion*, 12(1), 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2010.01.003>.
- Parlamento Europeu (2018). Regulamento (UE) 2018/1139 do Parlamento Europeu, Jornal Oficial da União Europeia, L 212, 22 de agosto de 2018. <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/1139/oj>.
- Prazeres, S. A. M. (2018). *Sistema integrado de dados geoespaciais aplicado à gestão de informação aeronáutica*. [Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas da Universidade Nova de Lisboa]. <https://run.unl.pt/handle/10362/59014>.
- Prazeres, S. A. M., Oliveira, J. A., & Duro, N. (2015). Monitorização E Modelação Geográfica Com Uav. *X Congresso Da Geografia Portuguesa: Os Valores Da Geografia Lisboa, 9 a 12 de Setembro de 2015*.
- Redweik, P. (2011). *Produção Cartográfica* (pp. 25–45). Texto nao publicado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Redweik, P. (2013). Photogrammetry. In G. Xu (Ed.), *Sciences of Geodesy - II: Innovations and Future Developments* (pp. 133–183). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28000-9_4.
- Redweik, P. (2019). *Fotogrametria Digital* (pp. 1–20). Texto nao publicado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Redweik, P. (2020). *Produção Cartográfica*. Texto nao publicado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- RiseAbove (2021). 29/09/2021. <https://www.riseabove.com.au/propeller-aeropoints-smart-ground-control-points-g>.
- Rokhmana, C. A. (2010). Some Notes on Using Balloon Photogrammetry for the Precise Plantation Some Notes on Using Balloon Photogrammetry for the Precise Plantation. *FIG Congress 2010*. http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2010/papers/ts08d/ts08d_catur_aries_4166.pdf.
- Rosa, M. M. L. F. S. (2013). *Contributo para o Estudo da Evolução das Arribas no Litoral de Torres Vedras: Monitorização por Fotogrametria Aérea e Terrestre* [Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10451/9590>.
- Santos, J. C. dos. (1996). O Direito Aéreo e a Aeronáutica Militar. In *Boletim do Instituto de Altos Estudos da Força Aérea, nº 9* (pp. 203–234).
- SATPALDA (2021). *5m Digital Surface Model & Digital Terrain Model*. 29/09/2021. <https://www.satpalda.com/5m-dsmdtm>.
- SenseFly (2021). 29/09/2021. <https://www.sensefly.com/pt/drone/ebee-x/>.
- Serra, L. A. de O. (2014). *O Potencial dos UAV para Atualização de Cartografia Municipal* [Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10451/15527>.
- Sik, H., Chool, J., Sik, M., Joon, I., & Kyum, C. (2004). *Construction of National Cultural Heritage Management System Using RC Helicopter Photographic Surveying System*.
- Syring, S., & Nylund, J. (2018). *Introducing UAS and Photogrammetry for Surveying and Surveilling New Project Sites* [Tese de Mestrado, Yrkeshögskolan NOVIA]. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201804184886>.
- Taddia, Y., Corbau, C., Zambello, E., Russo, V., Simeoni, U., Russo, P., & Pellegrinelli, A. (2017). UAVs to assess the evolution of embryo dunes. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2W6), 363–369. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-363-2017>.
- Tokmakidis, K., Ito, J., Mamoto, E., & Mori, F. (1998). Detail Surveys with Close-Range Photogrammetry in Archaeological Sites. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*,

- 32(5), 648–648. [https://doi.org/10.1016/0924-2716\(89\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0924-2716(89)90040-3).
- Vozikis, E. (1983). Analytical methods and instruments for mapping from balloon photography. *The Photogrammetric Record*, 11(61), 83–92. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.1983.tb00192.x>.
- Wallace, L. O., Lucieer, A., & Watson, C. S. (2012). Assessing the Feasibility of Uav-Based Lidar for High Resolution Forest Change Detection. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B7, 499–504. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxix-b7-499-2012>.
- Wester-Ebbinghaus, W. (1980). Aerial photography by radio controlled model helicopter. *The Photogrammetric Record*, 10, 85–92. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.1980.tb00006.x>.
- WITAS. (n.d.). *The Wallenberg laboratory for research on Information Technology and Autonomous Systems (WITAS)*. Retrieved October 1, 2019, from <https://www.ida.liu.se/ext/witas/>.
- Zischinsky, T., Dorffner, L., & Rottensteiner, F. (2000). Application of a New Model Helicopter System in Architectural Photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 33 B5, 177–183.

Anexos

Anexo I: Evolução dos UAS

Balão

Vozikis (1983) montou uma câmara, de médio formato, num balão *BCV D4*, fabricado pela companhia *Delacoste Company*, com 15,3 m³ de volume, para a produção de um mapa arqueológico. As fotografias foram obtidas com uma câmara *Hasselblad 500 ELM* com uma lente *Zeiss* de 50 mm (Eisenbeiss, 2009). A câmara estava num cardão e era capaz de girar sobre os seus principais eixos – ω , φ e κ – controlados remotamente. O levantamento foi feito a 25 m e resultou em seis fotografias, formando três pares estereoscópicos. Após o levantamento foi observado que a sobreposição das fotografias era irregular, assim foi utilizado o “*Wild Aviolyt ACI/Aviotab TA2 analytical plotting system and five ground control points (GCPs), with a RMSE (Root mean square error) in planimetry and height of 15 and 40mm*” (Eisenbeiss, 2009) para a orientação das imagens aéreas. Assim, foi possível a produção de um mapa arqueológico à escala 1:1000 (Vozikis, 1983). Os resultados mostraram que a utilização de balões equipados com câmaras de médio formato podem obter bons resultados para áreas reduzidas, no entanto, devido ao controlo manual do balão o bloco de imagem mostrou-se irregular (Eisenbeiss, 2009).

Celikoyan *et al.* (2003) fez uso de um balão de hélio e de fotografias terrestres para gerar um modelo 3D de um teatro localizado em Patara, uma cidade antiga na Turquia, de forma a poder ser guardado numa aplicação web-SIG e para fins de reconstrução arqueológica (Celikoyan *et al.*, 2003). O balão utilizado tinha 2,5 m de diâmetro, 8 m³ de volume e 8 kg de capacidade de carga. Este estava equipado com uma *Olympus C-4040* com um suporte de alumínio, capaz de girar sobre dois eixos (ω , φ), sendo que κ era influenciado pela rotação do balão, a 50 m de altitude. Deste estudo resultaram um ortofoto à escala 1:250, um plano detalhado do teatro a 1:100 e o desenho de 12 fachadas e 5 perfis à escala 1:50.

Rokhmana (2010) utilizou a fotogrametria para medir a altura das árvores e o diâmetro das suas copas. A motivação para a utilização de um sistema de balão foi pelo seu baixo custo e devido à dificuldade de descolagem causada pela topografia e cobertura da vegetação. As operações foram realizadas entre os 300 e os 800 m de altitude, com um balão de hidrogénio com um diâmetro de 8 m. A câmara fotográfica estava instalada num suporte *picavet* com dois eixos controlados remotamente (Rokhmana, 2010). No final resultaram um ortofoto 2D e as coordenadas 3D dos pontos, sendo que o diâmetro das copas podia ser extraído do ortofoto e a altura das árvores dos pontos 3D. Segundo o mesmo autor, a utilização deste sistema teve duas limitações, uma delas relacionadas com o difícil controlo da plataforma do balão e outra com as áreas de vegetação densa que não permitiam ver o terreno e dificultavam a extração da altura das árvores.

Durand *et al.* (2016) utilizou um balão de hélio com o objetivo de estimar a profundidade da neve a partir da reconstrução de fotografias aéreas. Este estudo foi realizado na bacia hidrográfica de Wolverton, no Sequoia National Park, Califórnia. Foi montada uma câmara que tirava fotos em intervalos de 3 segundos e um sistema de GPS capaz de guardar a posição e orientação da câmara na altura de cada fotografia. A medição desta profundidade foi possível através da diferença entre as medições das coordenadas 3D reconstruídas a partir dos levantamentos antes e depois da neve ter

derretido. No final do estudo foi possível atingir o principal objetivo com um “*erro médio quadrático de 7 cm, que equivale a 2% da profundidade máxima da neve, na área de estudo*” (Durand *et al.*, 2016).

Papagaios

Aber *et al.* (2002) apresentaram um *overview* da utilização de papagaios para a aquisição de fotografias aéreas de alta resolução para grandes escalas. Os testes foram feitos com câmaras montadas entre os 50 e 150 m usando diferentes tipos de papagaios dependendo das condições meteorológicas: “*small airfoil kites (1½ m²) are best for stronger wind (25-40 km/h); whereas, large rigid kites (3 m²) work better in lighter wind (15-25 km/h)*” (Aber *et al.*, 2002). O sistema foi testado usando câmaras de filme e digitais, usando sistemas stereo e multiespectral (Eisenbeiss, 2009). A utilização de papagaios revelou-se um método de baixo custo capaz de adquirir imagens de alta resolução, nas bandas do visível e infravermelho, para um conjunto diverso de aplicações.

Smith *et al.* (2009) realizou um estudo para a utilização de imagens aéreas de alta resolução, obtidas através de papagaio – uma plataforma de baixo custo, de muito fácil transporte e capaz operar em diversos ambientes – para a geração de MDE, que serviriam de *input* para futuros estudos geomorfológicos (Smith *et al.*, 2009). A câmara utilizada foi uma *Nikon D70*, com 6 MP e uma lente de 24 mm de grande angular. Foram feitos três testes, o primeiro teste, em novembro de 2005, foi feito a 60 m de altitude num campo de jogos coberto em Loughborough. Neste teste foram marcados 30 pontos de controlo. O segundo teste, em janeiro de 2006, foi feito a uma altitude de 50 m em Beacon Hill, Leicestershire. Neste teste foram marcados apenas 7 pontos de controlo. Por fim, o terceiro teste foi feito em dois dias de junho de 2006 em Gartocharm. O controlo terrestre foi feito através de um teodolito com medição de distância elétrica. Este voo foi realizado a 150 m de altitude, de forma a capturar grande parte da área de cobertura (Smith *et al.*, 2009), conseguindo obter 150 imagens com uma resolução espacial de 4 centímetros (0,04 m). A utilização deste tipo de plataforma veio provar que é possível obter imagens aéreas de alta resolução a baixo custo e em tempo útil.

Bryson *et al.* (2013) realizou o mapeamento de paisagens entre marés utilizando imagens aéreas de alta resolução e multiespectral. Para isso foi utilizado um papagaio com 2,7 m de envergadura e duas câmaras “*consumer-grade*” (*Sony NEX-5* de 16 MP e uma lente de 6mm) – uma para fotografias na banda do visível (RGB) e outra para fotografias na banda do próximo-infravermelho (NIR). Estas câmaras são suportadas por um “*picavet*” 10 m abaixo da altura do papagaio para evitar impactos causados pelas rajadas de vento. A área de estudo escolhida para este estudo foi uma costa rochosa entre marés a norte da praia de Greenfields, situada ao longo da costa oeste de Jervis Bay na Austrália. Na área de estudo foram utilizados 9 pontos de controlo e as imagens foram recolhidas a uma altitude entre os 15 e 20 m. Como resultados foram gerados ortomosaicos com uma resolução média de 5 mm, tendo algumas variações devido à altitude do papagaio e da perspectiva em que as fotografias foram tiradas, foram gerados um modelo digital de terreno, com uma distância média de 2,5 cm e mapas de inclinação e de orientação de vertentes a partir do MDT (Bryson *et al.*, 2013).

Helicóptero

No XVIII congresso do ISPRS, na Áustria, Miyatsuka (1996) apresentou uma visão global das plataformas existentes para a fotografia aérea e terrestre. No seu estudo Miyatsuka destacou que “*In large áreas, the best platform is the radio controlled model helicopter. It can carry up the cameras less than 300 m high.*” (Miyatsuka, 1996). No entanto, devido à câmara utilizada (Kodak DCS-460 de 6 MP e lente de 28 mm) não apresentava resolução necessária para aplicação arqueológica, visto que tinha que voar numa altitude suficiente para cobrir toda a área e recolher o mínimo de imagens possível

(Eisenbeiss, 2009). Assim foi proposto a utilização de uma câmara de médio formato como a *Hasselblad Metric Camera*.

Tokmakidis *et al.* (1998) reconheceu a importância de realizar levantamentos fotográficos aos monumentos para preservar a herança cultural e para obter planos detalhados desses mesmos documentos para ser possível a reparação, reconstrução e/ou preservação desses mesmos monumentos. Assim, foram apresentados três métodos para a reconstrução do *Tholos in Delphi*. O primeiro método consistiu no uso de um poste de metal sobre um suporte de aço no chão. “*The pole could moved by ropes in all directions, and shifted over certain points for the shots to be taken*” (Tokmakidis *et al.*, 1998) e “*maneuverable by several persons at a height of 6m*” (Eisenbeiss, 2009). No topo do poste foi utilizada uma câmara Hasselblad de médio formato. No segundo método foi utilizada uma plataforma de metal em volta de duas grandes pedras com o objetivo de fotografar todos os pormenores. Foram estabelecidos seis pontos de controlo de forma a serem visíveis em ambos os lados da fotografia (Tokmakidis *et al.*, 1998). A câmara utilizada neste método foi uma câmara aérea métrica (18x18) capaz de obter precisões entre os 1 e 2 metros. Por fim, no terceiro método, foi utilizada a fotografia aérea do monumento utilizando um “*model helicopter*” com uma câmara *Hasselblad* (Tokmakidis *et al.*, 1998).

Outro projeto de relevância foi o *Wallenberg Laboratory for Information and Autonomous Systems* (WITAS) entre os anos de 1997 e 2005. Este programa consistiu em três fases (fase 1: 1997-1999; fase 2: 2000-2003; fase 3: 2004-2005) para o estudo na área de veículos autónomos inteligentes, focando-se no desenvolvimento de um sistema aéreo capaz de tomar decisões sobre uma aeronave tendo por base conjuntos de dados pré-carregados, resposta dos sensores e através de *data links*. Os principais objetivos deste programa eram demonstrar até ao ano de 2003 um UAS com grande capacidade de autonomia e efetuar estudos relevantes para desenvolver o *design* e desenvolvimento desses equipamentos. O programa foi concluído com sucesso em outubro de 2003 tendo uma extensão (fase 3) até 2005 onde o trabalho foi organizado em dois projetos distintos: *The WITAS Autonomous UAV Technologies Project* e *The WITAS Dialogue Technology Project* (WITAS, n.d.).

Zischinsky *et al.* (2000) gerou um modelo 3D de um moinho histórico através de fotografias aéreas, obtidas por um helicóptero teleguiado, e fotografias terrestres (Eisenbeiss, 2009). Para a representação do moinho foram tiradas 82 fotografias a partir do chão com recurso a uma *Kodak DCS460c* – com distâncias focais de 15 mm e 28 mm – e 38 fotografias aéreas – com distâncias focais de 37 mm e 48 mm – e foram marcados 120 pontos de controlo (Zischinsky *et al.*, 2000). A orientação das imagens foi dividida em dois sub-blocos, um para as fotografias terrestres e outro para as fotografias aéreas. Assim, foi feita a determinação das orientações desses sub-blocos individualmente com o *software ORPHEUS* (desenvolvido pela *Vienna University of Technology*). Foi obtida uma média de 2 cm de Erro Médio Quadrático (EMQ) para planimetria e altimetria através da orientação de ambos os sub-blocos (Zischinsky *et al.*, 2000). A textura e a modelagem dos objetos foi feita através do *ORPHEUS* e *Photomod* (também desenvolvido na mesma instituição), resultando então num modelo final constituído por “*703 triangles (...) with about 10 million texture elements of 5 x 5 cm²*” (Zischinsky *et al.*, 2000).

Em 2004, no congresso do ISPRS em Istambul, foram apresentados dois artigos sobre UAS com helicópteros. Nagai *et al.* (2004) apresentou no congresso do ISPRS em Istambul um artigo relacionado com a integração de um sistema *laser scanning* em helicópteros teleguiados. Esse sistema era composto por um helicóptero Subaru RPH2 com 330 kg, 100 kg de equipamento e com pás de 4,8 m (Nagai *et al.*, 2004). Sik *et al.* (2004) apresentou um artigo da utilização de mini UAS para a representação 3D de templos e torres antigas através de fotogrametria de curto alcance. Foi utilizado um *Hiboro & Eagle 90* com suporte compatível para diferentes sistemas de câmaras como “*miniature (35 mm), medium (6x4.5 cm), Panorama (6x12 cm), DV (6 mm 3CCD), 35 mm film movie and digital video (CCD: charge*

coupled device)” (Sik *et al.*, 2004). As fotografias foram tiradas a uma altitude de 200 m e cobriam todos os lados do templo.

Gallay *et al.* (2016) utilizou um helicóptero remotamente comandado de forma a demonstrar que os UAS são capazes de adquirir dados LiDAR com elevada precisão e resolução e imagens hiperespectrais. Assim, utilizou um helicóptero B1-100 da *Aeroscout GmbH*. Este equipamento tinha um MTOM (*Maximum Take-Off Mass*²¹) de 75 kg, era resistente a água, permitia realizar voos até 90 minutos e está equipado com um sistema de autopiloto *wePilot3000*. Para a realização deste estudo foram utilizados dois tipos de sistemas de aquisição de dados: (1) *Laser scanner VUX-1*, da *Riegl*, e uma câmara fotográfica *Sony A6000*; (2) câmara *AISA KESTREL 10*, da *SPECIM*. O primeiro sistema é dedicado à aquisição de dados LiDAR e a aquisição de fotografias de alta resolução (Gallay *et al.*, 2016). O segundo sistema é dedicado a mapear paisagens através de um varrimento hiperespectral de alta resolução entre os 400 e 1000 nm (Gallay *et al.*, 2016). Os testes para a aquisição dos dados LiDAR foram feitos a uma altitude de 30 m, a uma velocidade de 550 kHz e com uma densidade de pontos igual a 1111 pontos/m². Os testes para a aquisição de fotografias hiperespectrais foram tiradas a uma altitude de 140 m e com um comprimento de bandas igual a 6,9 nm. Com a realização destes testes, foi possível demonstrar que o sistema utilizado era estável para a aquisição de imagens aéreas de alta resolução e nuvens de pontos com alta resolução geométrica (Gallay *et al.*, 2016).

²¹ Massa máxima operacional.

Anexo II: Faseamento do trabalho

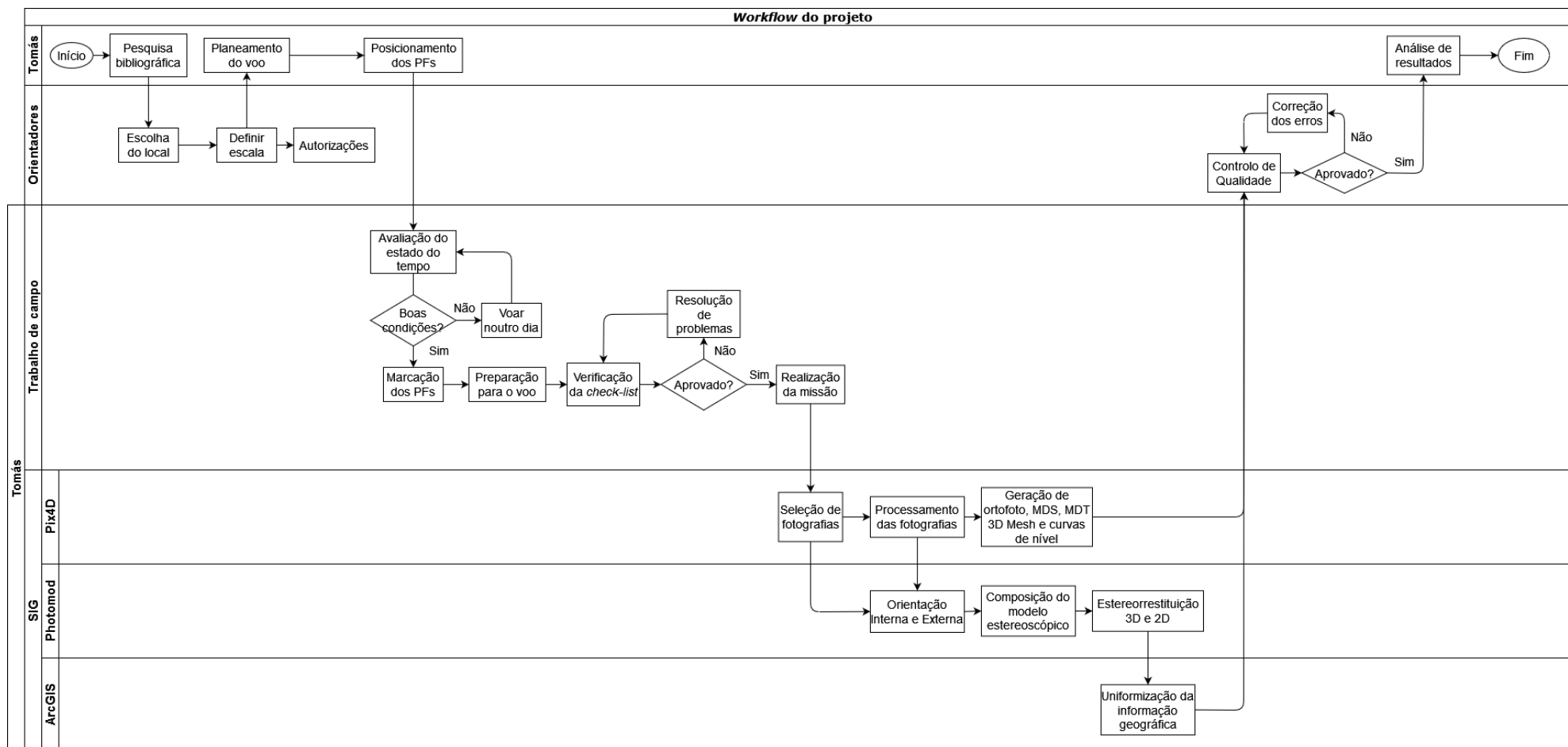


Figura AII.1 – Faseamento do trabalho.

Anexo III: Restituição sobreposta ao ortomosaico



Figura III.1 – Mapa da Restituição sobre o ortomosaico.

Legenda:

Toponímia

- Vila

Altimetria

- Ponto cotado
- Curva de nível

Transportes

- Junção
- Fim da via rodoviária
- Infraestrutura
- ▲ Parque de estacionamento
- Veículo ligeiro ou pesado
- Pedonal
- Via rodoviária - Limite
- Área da inf. de transp. rodoviário

Construções

- Muro de alvenaria ou betão
- Sebe
- Gradeamento ou vedação
- Portão
- Piscina
- ≡ Escadaria
- Limite da construção Linear
- Residencial
- Associado à residência
- Comércio tradicional
- Barraca
- Estufa
- Ruína

Ocupação do solo

- Agricultura
- Vegetação herbácea natural
- Sistema agroflorestal
- Eq comerciais ou de carácter geral

Infraestruturas e serviços de interesse público

- Poço
- Câmara de visita
- Apoio de iluminação e baixa tensão
- Apoio de baixa tensão
- Poste telefónico
- Baixa tensão
- Valeta

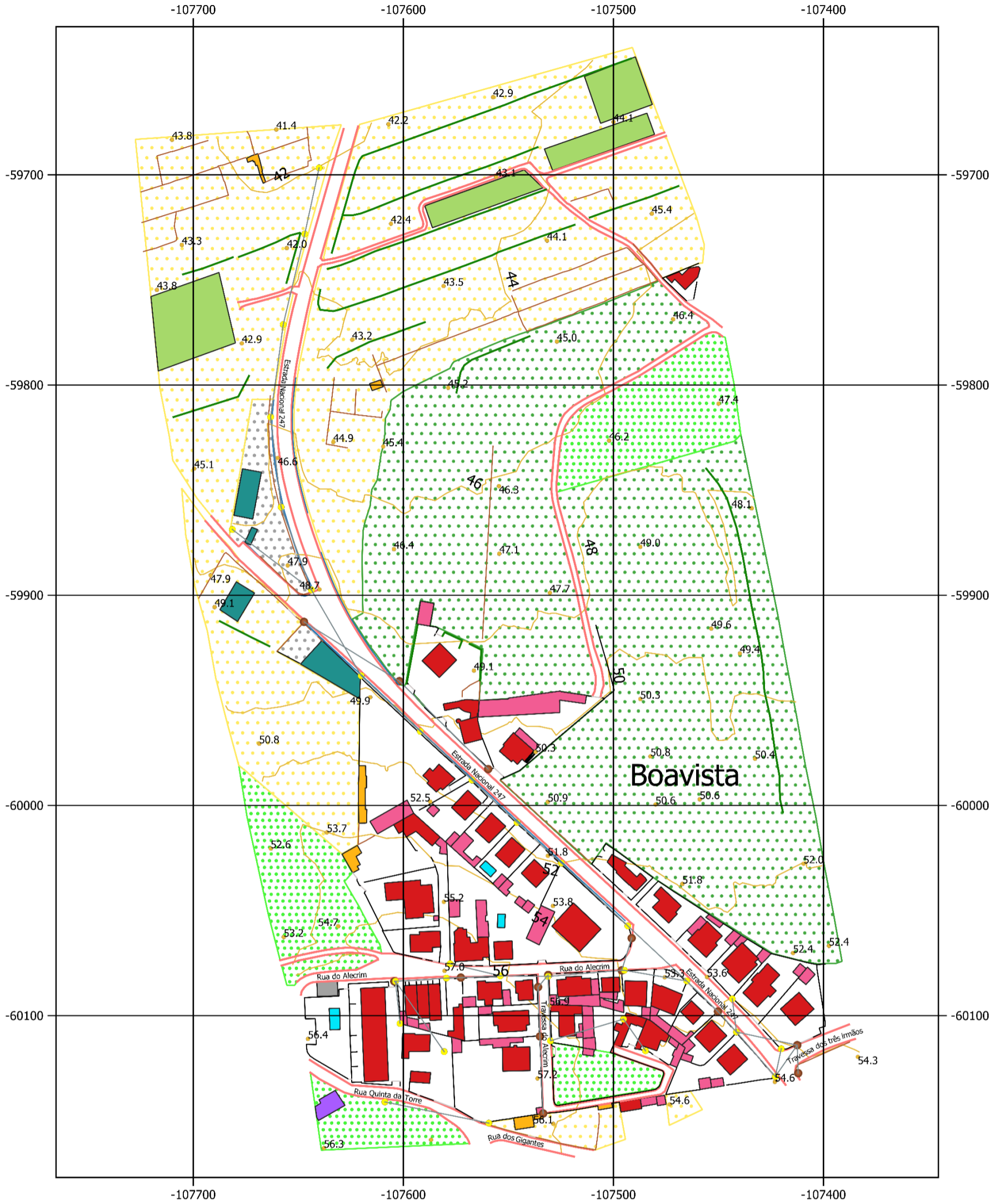
Mobiliário urbano e sinalização

- Contentor
- Ecoponto
- Sinal de trânsito

Figura III.2 – Legenda de “Mapa da Restituição sobre o ortomosaíco”.

Anexo IV: Mapa de Boavista

Mapa de Boavista



ALTIMETRIA	Sebe	Estufa	Área de comércio
Ponto cotado	Vedação	Comércio	INFRAESTRUTURAS
Curva de nível	Portão	Barraca	Poste de baixa tensão
TRANSPORTES	Piscina	Ruína	Poste telefónico
Ruas	Escadaria	OCUPAÇÃO DO SOLO	Cabo eléctrico
Estacionamento	Residencial	Agricultura	Valeta
CONSTRUÇÕES	Associado à residência	Vegetação natural	
Muro		Sistema agroflorestal	

Sistema de Referência: ETRS89/PT-TM06

0 50 100 m



ESCALA 1:2000

Data da informação: Maio 2021

Autor: Tomás Machado

Anexo V: Fichas de PF



Ciências
ULisboa



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 100

Coordenadas PT-TM06/ETRS89

M = -107856,400

P = -59212,050

Cota Terreno = 36.551m

Morada: Rua Alice Pedro Pronto.

Descrição: Ponto situado a meio da tampa de visita.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 101

Coordenadas PT-TM06/ETRS89
M = -107749.252
P = -59572.636
Cota Terreno = 42.747m

Morada: Aeroclube de Torres Vedras.
Descrição: Ponto situado no canto esquerdo orientado a Sul.
Data de Aquisição: 03 de abril de 2020



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 102

Coordenadas **PT-TM06/ETRS89**

M = -107914.571

P = -59699.102

Cota Terreno = 43.919m

Morada: Aeroclube de Torres Vedras.

Descrição: Ponto situado no final da pista de ultraleves orientado a Sul.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 103

Coordenadas PT-TM06/ETRS89
M = -107795.186
P = -60005.715
Cota Terreno = 50.733m

Morada: Aeroclube de Torres Vedras.

Descrição: Ponto situado na faixa central da pista principal do Aeródromo, no canto esquerdo.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 105

Coordenadas PT-TM06/ETRS89
M = -107618.421
P = -59642.284
Cota Terreno = 42.156m

Morada: Estrada Nacional 247.
Descrição: Ponto situado na beira da faixa de rodagem.
Data de Aquisição: 03 de abril de 2020



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 106

Coordenadas PT-TM06/ETRS89
M = -107640.728
P = -59909.126
Cota Terreno = 48.467m

Morada: Estrada Nacional 247.
Descrição: Ponto situado na junção entre a estrada nacional e o caminho municipal.
Data de Aquisição: 03 de abril de 2020



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 107

Coordenadas PT-TM06/ETRS89

M = -107486.281

P = -60052.246

Cota Terreno = 52.605m

Morada: Estrada Nacional 247.

Descrição: Ponto situado no centro da tampa de visita CTT na beira da faixa de rodagem.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020





Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 108

Coordenadas PT-TM06/ETRS89

M = -107575.538

P = -60148.022

Cota Terreno = 56.788m

Morada: Rua Quinta da Torre.

Descrição: Ponto situado na bifurcação.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 109

Coordenadas PT-TM06/ETRS89
M = -107517.309
P = -60262.789
Cota Terreno = 59.657m

Morada: Rua Quinta da Torre.

Descrição: Ponto situado na tampa de visita da bifurcação.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020





Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 110

Coordenadas PT-TM06/ETRS89

M = -107404.292

P = -60330.382

Cota Terreno = 58.434m

Morada: Rua do Moinho Velho.

Descrição: Ponto situado na tampa de visita sobre o passeio, no canto superior direito orientado a Oeste.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 111

Coordenadas PT-TM06/ETRS89

M = -107410.264

P = -60504.491

Cota Terreno = 55.719m

Morada: Rua das Palmeiras.

Descrição: Ponto marcado no meio da faixa de rodagem.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 115

Coordenadas PT-TM06/ETRS89

M = -107625.762

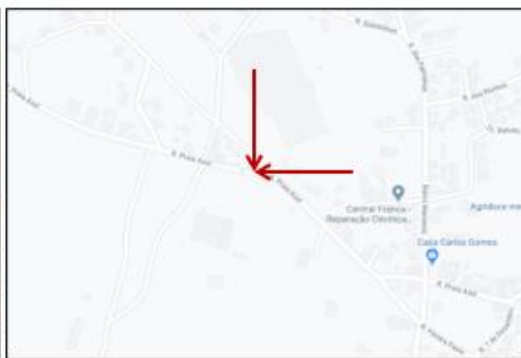
P = -60739.631

Cota Terreno = 59.969m

Morada: Rua da Praia Azul.

Descrição: Ponto marcado no meio da faixa de rodagem.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 116

Coordenadas PT-TM06/ETRS89

M = -107796.621

P = -60739.631

Cota Terreno = 60.457m

Morada: Rua da Praia Azul.

Descrição: Ponto marcado num caminho agrícola.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 117

Coordenadas PT-TM06/ETRS89

M = -107768.409

P = -60569.745

Cota Terreno = 64.350m

Morada: Estrada M830.

Descrição: Ponto à beira da estrada. Não existe fotografia da sua marcação.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 119

Coordenadas PT-TM06/ETRS89

M = -107663.927

P = -60405.221

Cota Terreno = 62.732m

Morada: Estrada M830.

Descrição: Ponto marcado numa tampa de visita retangular, no canto superior direito orientado a Este.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 121

Coordenadas PT-TM06/ETRS89

M = -107801.654

P = -60237.063

Cota Terreno = 60.716m

Morada: Estrada M830.

Descrição: Ponto marcado numa tampa de visita situada num caminho agrícola.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 135A

Coordenadas PT-TM06/ETRS89

M = -108177.236

P = -59418.761

Cota Terreno = 37.758m

Morada: Rua Casal do Nascimento.

Descrição: Ponto marcado no meio da faixa da rua junto ao limite das canas.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 137

Coordenadas **PT-TM06/ETRS89**

M = -108036.710

P = -59480.920

Cota Terreno = 38.702m

Morada: Rua Casal do Nascimento.

Descrição: Ponto marcado na beira da rua.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020





Ciências
ULisboa



Registo de Pontos Fotogramétricos

P.F: 139

Coordenadas PT-TM06/ETRS89

M = -108035.326

P = -59575.706

Cota Terreno = 40.471m

Morada: Rua dos Primores.

Descrição: Ponto marcado na beira da rua.

Data de Aquisição: 03 de abril de 2020

