

Utilização de dados de VANT no mapeamento e na gestão de operações mineiras e ambientais em pedreiras

Raquel Sofia da Cruz Morais

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Geológica e de Minas

Orientadores:

Professor Doutor Pedro Miguel Berardo Duarte Pina

Dr. Luís Miguel da Rosa Goulão Freire

Júri

Presidente: Professora Doutora Maria Amélia Alves Rangel Dionísio

Orientador: Professor Doutor Pedro Miguel Berardo Duarte Pina

Vogal: Professor Doutor Gustavo André Paneiro

Julho de 2021

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

À memória da minha querida avó

Agradecimentos

Este espaço é dedicado a todos os que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização da presente dissertação.

Ao Professor Doutor Pedro Miguel Berardo Duarte Pina, orientador científico deste trabalho, a quem devo um profundo agradecimento pelo seu profissionalismo, dedicação, compreensão e disponibilidade sempre demonstrada durante a realização da dissertação. Agradeço ainda os ensinamentos e os conselhos dados, assim como todo o apoio e confiança depositada nas minhas capacidades.

À empresa Filstone- Comércio de Rochas, S.A que me recebeu de braços abertos e me acompanhou ao longo do meu percurso académico e início de vida profissional, demonstrando sempre a sua disponibilidade, colaboração e apoio prestados. Em particular ao Administrador da empresa Sr. Ricardo Jorge por ter possibilitado a realização da presente dissertação e ter adquirido o equipamento necessário para a realização da mesma. Um agradecimento especial aos meus colegas de trabalho que me apoiaram e deram força para terminar esta etapa.

Os meus agradecimentos ao Gabriel Goyanes que sempre se mostrou disponível para me ajudar e esclarecer todas as minhas dúvidas que foram surgindo ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus pais, à minha irmã e ao meu namorado, a quem devo um profundo agradecimento por todos os valores que me passaram, por acreditarem nas minhas capacidades e por nunca me deixarem desistir dos meus sonhos e objetivos.

À minha querida avó, a quem dedico a minha dissertação, só posso agradecer por todo o apoio, carinho e orgulho demonstrado à medida que fui alcançado todas as minhas conquistas.

A todos vós deixo o meu mais profundo e sincero obrigado!

Resumo

Contrariamente a tantos outros setores, nos quais as vantagens da utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) já foram exaustivamente explorados, quando falamos da indústria extrativa ainda prevalecem os levantamentos tradicionais mais caros, demorados e menos seguros. O baixo custo aliado à alta precisão e eficiência notável no tempo possibilitam que os VANTs se tornem num método confiável de aquisição de dados na indústria extrativa, servindo como ferramenta de apoio na modelação 3D, cálculos de distâncias e volumes e monitorização geológica e ambiental.

Na presente dissertação será avaliada a capacidade da utilização dos dados de VANT como ferramenta de apoio às operações da indústria extrativa, tais como a realização do levantamento topográfico da pedreira de forma a apoiar a monitorização e planeamento do desmonte, a inventariação 3D do material desmontado e das pilhas de agregados e ainda a extração da rede de drenagem e o estudo do impacto das poeiras sobre a vegetação envolvente. Será ainda avaliada a qualidade desses produtos com e sem pontos de controlo e efetuada uma comparação dos volumes com modelos matemáticos e com a sua massa real.

O estudo proposto implica a captação de imagens com recurso ao VANT, a coleta de coordenadas no terreno com um recetor GNSS, o processamento dos dados e a criação de produtos fotogramétricos nomeadamente, nuvens de pontos, ortofotos e modelos digitais de superfície. Concluiu-se que a utilização de dados de VANT na indústria extrativa permite otimizar os processos com maior agilidade e precisão, possibilitando um mais rápido planeamento estratégico das decisões, assim como a monitorização e registo temporal das atividades.

Palavras-Chaves: Veículo aéreo não-tripulado, VANT, mapeamento de pedreira, gestão de operações de pedreira, gestão ambiental

Abstract

Unlike so many other sectors, where the advantages of using Unoccupied Aerial Vehicles (UAVs) have already been thoroughly exploited, when we talk about the extractive industry, more expensive, time-consuming, and less secure traditional surveys still prevail. The low cost combined with high accuracy and remarkable efficiency in time enable UAVs to become a reliable procedure of data acquisition in the extractive industry, serving as a support tool in 3D modeling, distance and volume calculations, and geological and environmental monitoring.

In this dissertation will be evaluated the capacity of the use of UAV data as a tool to support the operations of the extractive industry, such as the development of the topographic surveys of the quarry to support the monitoring and planning of the dismantling, the 3D inventory of the disassembled material and aggregate piles, as well as the extraction of the drainage network and the study of the impact of dust on surrounding vegetation. The quality of these products with and without control points will be also evaluated together with the comparison of volumes estimation with mathematical models and actual weights.

The proposed study involves the capture of images using an UAV, the collection of coordinates on the ground with a GNSS receiver, the processing of data and the creation of photogrammetric products, namely, point clouds, orthophotos and digital surface models. It was concluded that the use of UAV data in the extractive industry allows optimizing processes with greater agility and precision, enabling strategic planning of decisions in a faster way, as well as monitoring and recording the temporal activities.

Keywords: unoccupied aerial vehicle, UAV, quarry mapping, quarry operations management, environmental management

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Empresa parceira na realização do estudo.....	2
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs)	5
2.2. História dos VANTs	6
2.3. Tipos de VANTs	9
.....	10
2.4. Sensores acoplados nos VANTs.....	10
2.5. Aplicação dos VANTs na Indústria Extrativa	12
2.6. Legislação portuguesa para a operação de VANTs.....	14
2.7. Fotogrametria: Definição e conceitos	15
2.7.1. Fotogrametria Aérea.....	17
3. Materiais e Métodos	21
3.1. Metodologia	21
3.1.1. Medição de Volumes	24
3.1.2. Identificação de Rede de Drenagem.....	26
3.1.3. Análise do impacto das poeiras.....	27
3.2. Equipamento.....	29
3.3. Software.....	31
3.4. Fluxo de Trabalho.....	32
3.4.1. Fase 1- Preparação do voo	32
3.4.2. Fase 2- Realização do voo e recolha de dados	34
3.4.3. Fase 3- Processamento dos Dados	36
4. Resultados e Discussão	41
4.1. Mapeamento da Pedreira	41
4.1.1. Análise da utilização de Pontos de Controlo.....	46
4.1.2. Ferramenta de apoio à produção	48
4.2. Medição de volumes.....	54
4.2.1. Medição do volume das pilhas de agregados – Unidade de Britagem	54
4.2.2. Análise da capacidade de medição de volumes	60
4.3. Análise da drenagem das águas superficiais - Oficinas	62
4.4. Análise do impacto da atividade extrativa na vegetação – Núcleo Extrativo Casal Farto	66
5. Conclusões e trabalhos futuros	71
6. Bibliografia	73

Índice de Figuras

Figura 1: Localização da pedreira explorada pela empresa Filstone – Comércio de Rochas, S.A, no mapa de Portugal.	3
Figura 2: Localização geográfica da empresa Filstone - Comércio de Rochas, S.A. e do parque de blocos inserido no Aeródromo de Fátima (adaptado de Google Earth, acedido em março de 2021)	3
Figura 3: Partes constituintes de um drone multi-rotor (Adaptado de FlyPro, 2020).....	6
Figura 4: Balões Australianos utilizados no ataque a Veneza, a 22 de Agosto de 1849 (CTIE, 2003)..	6
Figura 5: Primeiro VANT americano Kettering Bug (Hunt, 2017)	7
Figura 6: Radioplane OQ-2 (Wilson, 2020)	7
Figura 7: Pioneer QR-2 (wikipedia, 2021)	7
Figura 8: Predator RQ-1/MQ-1 (wikipedia, 2021)	8
Figura 9: VANTs de asa fixa (à esquerda) e multirotores (à direita) (adaptado de Hu et al, 2019).....	10
Figura 10: Espectro da radiação eletromagnética (adaptado de Kerr et al., 2011)	11
Figura 11: Requisitos gerais de operação da Categoria Aberta (Skyphoto, 2021).....	14
Figura 12: Requisitos de operação na Categoria Específica (Skyphoto, 2021)	15
Figura 13: Diferença entre exatidão e precisão (baseado em Ruotsala, 2020).....	17
Figura 14: Imagem exemplificando o processo de estereoscopia através dos olhos humanos (adaptado de DronEng, 2021)	17
Figura 15: Plano de sobreposição de imagens (baseado em Gondim, 2018)	18
Figura 16: Relação entre a altura de voo, distância focal real, largura real do sensor e distância percorrida no solo pelo VANT (baseado em Pix4DMapper, 2017)	19
Figura 17: Relação entre a sobreposição frontal das imagens od, a distância percorrida no solo D, a velocidade de voo v e a distância entre duas fotografias consecutivas x (baseada em Pix4DMapper, 2017).....	20
Figura 18: Fluxograma resumindo a metodologia aplicada para se chegar ao produto final	22
Figura 19: Etapas do processo de obtenção dos produtos fotogramétricos ortofoto e modelo digital de terreno (MDT) (adaptado de Gillians et al.,2021).....	24
Figura 20: Esquema de uma malha sobre a área de medição (Pix4DMapper, 2017).....	25
Figura 21: Exemplo da janela de pesquisa do algoritmo D8 (baseado em ArcGis, 2021)	26
Figura 22: Exemplo do cálculo do fluxo acumulado de cada uma das células a partir do mapa de direção de fluxo (baseado em ArcGis, 2021)	27
Figura 23: Exemplo de uma rede de drenagem formada pela junção de canais interligados por pontos de saída	27
Figura 24: Veículo aéreo não tripulado da marca Dji e modelo Phantom 4 RTK	29
Figura 25: Antena GNSS da marca Dji e modelo D-RTK 2	30
Figura 26: Definição do polígono delimitador da área de voo no software Google Earth	33
Figura 27: a) Plano de voo linear simples e b) plano de voo em grelha dupla (Pix4DMapper, 2017)..	33
Figura 28: Definição do trajeto de voo, para a área definida pela polígono KML, com base nos parâmetros de voo e imagem definidos no software integrado no controlo remoto da DJI.....	34
Figura 29: Medição dos pontos de controlo no terreno (a) com recurso à antena móvel (b)	35

Figura 30: Início da execução da missão (disponibilizado por Filstone- Comércio de Rochas, S.A.)..	36
Figura 31: Atributos dos sistemas de referência WGS 84 e PT-TM06	37
Figura 32: Altura elipsoidal, altura ortométrica e ondulação do geóide	38
Figura 33: Etapas de processamento dos dados.....	39
Figura 34: Alinhamento das imagens e identificação de pontos comuns nas mesmas	41
Figura 35: Nuvem esparsa de pontos (Pontos de Empate) resultantes do mapeamento da pedreira: a) imagem geral e b) pormenor de uma bancada	42
Figura 36: Marcação dos pontos de controlo na nuvem esparsa de pontos	43
Figura 37: Nuvem de pontos densa: a) imagem geral e b) pormenor de uma bancada	44
Figura 38: Malha texturizada 3D: pormenor de uma bancada (a) e comparação do resultado de uma nuvem de pontos (b) com a malha texturizada resultante (c)	45
Figura 39: Modelo Digital de Superfície (MDS) da área da pedreira, com escala de elevações em metros (à esquerda) e representado em modo sombreado (à direita)	45
Figura 40: Modelo Digital de Terreno (MDT) da área da pedreira, com escala de elevações (à esquerda) e representado em modo sombreado (à direita).....	46
Figura 41: Ortofoto da área da pedreira	46
Figura 42: Distribuição dos pontos de controlo (cruzes azuis) sobre as 5 áreas mapeadas. Os pontos que se encontram nas imagens representam o deslocamento entre as posições iniciais (pontos azuis) e as posições calculadas (pontos verdes) das imagens capturadas pelo VANT. Os pontos vermelhos indicam as imagens desativadas ou não calibradas.	48
Figura 43: Deslocamento absoluto nas coordenadas dos produtos gerados.....	48
Figura 44: Medição do comprimento da bancada na nuvem de pontos densa com o software Pix4DMapper	49
Figura 45: Levantamento topográfico à escala 1/500 da área da pedreira explorada pela empresa Filstone- Comércio de Rochas, S.A. relativo ao final do mês de outubro de 2020.....	50
Figura 46: Aproximação da Figura 45 com pormenor do planeamento das frentes de trabalho. Na cor laranja estão representadas as talhadas planeadas para o desmonte do mês de outubro de 2020, a cor-de-rosa as talhadas já derrubadas, com o respetivo número de referência da talhada, e a verde o nome de cada uma das frentes de desmonte.	51
Figura 47: Imagens capturadas para medição do volume da talhada desmontada	51
Figura 48: Ortofoto da talhada desmontada.....	52
Figura 49: Aproximação do ortofoto da Figura 48 com pormenor da marcação da talhada, representada pelas linhas tracejadas a cor de laranja.....	53
Figura 50: Medição do volume, representado pela cor verde na imagem, de material vendável por tipo de massa numa subtalhada	53
Figura 51: Cortes de esquadramento (vermelho) e esquadramento (azul e amarelo) necessários para finalizar os blocos com valor ornamental	54
Figura 52: Processo de calibração das imagens. A azul a posição inicial das imagens, a verde a posição calculada das imagens que ficaram bem calibradas e a vermelho as imagens que ficaram mal calibradas.	55

Figura 53: Exemplo de uma das imagens desfocadas (à esquerda) e de uma das imagens superexpostas (à direita)	55
Figura 54: Nuvem de pontos esparsa (pontos de ligação) do levantamento efetuado na unidade de britagem.....	56
Figura 55: Nuvem de pontos densa do levantamento efetuado na unidade de britagem	56
Figura 56: Classificação da nuvem de pontos: a roxo as estruturas a desativar da nuvem de pontos, a azul algumas estruturas manufaturadas, a verde a vegetação e a amarelo o solo e stocks	57
Figura 57: Nuvem de pontos antes (a) e após (b) a classificação, com conseqüente remoção das telas transportadoras e tubos de saída do produto	57
Figura 58: Modelo digital de superfície após a eliminação das telas de transporte	59
Figura 59: Exemplos de algumas pilhas de agregados medidas com o software Pix4DMapper	59
Figura 60: Ortofoto da unidade de britagem	60
Figura 61: Representação geométrica da pilha de brita 30/80mm.	61
Figura 62: Medição do volume de 101 blocos ornamentais dispostos em filas no parque de blocos ..	61
Figura 63: Extrato do ortofoto resultante do levantamento efetuado à área da pedreira, com destaque na zona das oficinas	63
Figura 64: Modelo digital de superfície (a) e modelo digital de terreno (b) da área envolvente das oficinas.....	63
Figura 65: Mapa do escoamento das águas superficiais. A cor vermelha identifica os locais onde a probabilidade para haver escorrência das águas é maior, enquanto a cor azul representa os locais onde essa probabilidade é menor.	64
Figura 66: Mapa de acumulação de fluxo	64
Figura 67: Extração da rede de drenagem com base no número de células de fluem para cada célula: superior a 100 (a), superior a 500 (b) e superior a 1000 (c)	65
Figura 68: Rede de drenagem sobreposta no ortofoto da área das oficinas	65
Figura 69: Ortofotos da área da unidade de britagem no período de tempo seco (à esquerda) e no período de tempo húmido (à direita) com destaque na zona de deposição de poeiras sobre a vegetação	67
Figura 70: Índice de vegetação VARI (à esquerda) e RGBVI (à direita)	68
Figura 71: Índice de vegetação MGRVI (à esquerda) e NDVI (à direita).....	68
Figura 72: Índice de vegetação GLI no período de tempo seco (à esquerda) e no período de tempo húmido (à direita).....	69

Índice de Tabelas

Tabela 1: Índices de vegetação com base nas bandas vermelho (R), verde (G) e azul (B)	28
Tabela 2: Especificações técnicas Phantom 4 RTK (baseado em drdome (2020))	30
Tabela 3: Requisitos mínimos e recomendados do sistema pelo Pix4DMapper e especificações do computador utilizado	31
Tabela 4: Erro RMSE médio no georreferenciamento dos produtos gerados e respetiva translação das coordenadas	47
Tabela 5: Cálculo dos volumes dos blocos por massa (sendo que cada fila corresponde a um tipo de massa, identificadas presencialmente) com recurso ao software Pix4DMapper.....	62
Tabela 6: Comparação do peso dos blocos obtido pelo cálculo do volume com recurso ao software Pix4DMapper e da sua pesagem	62

1. Introdução

A exploração de massas minerais em pedreiras, tem grandes tradições em Portugal e grande impacto na economia, quer das regiões onde ocorrem, quer a nível nacional, sendo relevante o papel desempenhado no plano das exportações (Direção Geral de Energia e Geologia, s.d.).

A constante busca pelo aumento da produtividade nas operações unitárias e da redução de custos de produção propicia e estimula o desenvolvimento e aperfeiçoamento de ferramentas e métodos que auxiliem a tomada de decisão nas rotinas de trabalho dos diversos setores do processo produtivo da indústria mineral, desde o planeamento das atividades, passando pela otimização das operações unitárias inerentes ao ciclo produtivo mineral, até chegar à monitorização do meio ambiente e à reabilitação das áreas degradadas pela atividade extrativa (Vasconcelos, et al., 2018).

O sucesso ou fracasso de um empreendimento mineral está diretamente relacionado com a gestão de cada projeto, sendo essencial modelar e dimensionar de forma rápida e eficaz todas as etapas envolvidas na produção, desde a geologia até aos stocks do produto final, passando pela definição da reserva mineral, até a gestão de resultados que devem estar em conformidade com a legislação em vigor (Agra, 2014; Nagendran & Ismail, 2020; Vasconcelos et al., 2018).

1.1. Motivação

Os métodos tradicionais de levantamento topográfico utilizam estações totais e sistemas de posicionamento global (GPS), morosos e por vezes arriscados em termos de segurança, exigindo muitas leituras do terreno para uma modelação e medição precisas do mesmo. Embora o método convencional tenha sido o mais utilizado na caracterização de massas rochosas em pedreiras, o uso da fotogrametria com VANT tem-se mostrado confiável e eficaz, tanto na área da mineração como nas restantes aplicações de engenharia, graças à sua acessibilidade, rapidez e relativo baixo custo de investimento (Salvini et al., 2017; González-Aguilera et al., 2012).

O levantamento fotogramamétrico permite produzir ortofotos digitais, modelos digitais de superfície (MDS) e nuvens de pontos com o auxílio do algoritmo *Structure from Motion* (SfM) (Esposito et al., 2017). A análise das imagens de VANT pela abordagem SfM constitui uma ferramenta robusta e confiável para reconstruir e monitorizar pedreiras com muito elevada resolução. Os produtos digitais obtidos a partir do processamento fotogramétrico fornecem também uma ferramenta útil para a gestão do risco ambiental de áreas de exploração mais perigosas e inacessíveis e melhoram a interpretação geotécnica para a tomada de decisões (Rossi et al., 2017).

A aplicação dos VANTs na indústria extrativa ainda precisa de ser explorada com mais profundidade em diferentes ambientes e testando variadas plataformas e sensores. No entanto, poderão ser amplamente utilizados em levantamento de terrenos e modelação 3D, avaliação da degradação ambiental e monitorização ecológica, riscos geológicos e monitorização de poluição, bem como na avaliação da recuperação de terrenos e restauração ecológica (Hu et al, 2019).

Neste contexto, o objetivo principal para o desenvolvimento desta dissertação, é a avaliação detalhada da inovação tecnológica no uso de um VANT multirrotor para realizar o levantamento topográfico de uma pedreira a céu aberto com o intuito de mapear a pedreira e gerar ganhos de produtividade, contribuindo para um melhor planeamento e gestão da pedreira.

Atualmente, já existem alguns estudos com recurso a dados de VANTs que alcançaram níveis de sucesso, no entanto a utilização deste tipo de equipamentos está ainda numa fase preliminar na indústria extrativa e carece de uma análise sistemática do trabalho existente (Hu, 2019). O carácter inovador da presente dissertação denota-se não na utilização de VANTs para mapear uma pedreira a céu aberto, mas pela sua componente de largo espectro, que aborda vários temas e exemplos de aplicação, mas nenhum deles aprofundadamente, analisando as principais potencialidades desta tecnologia na indústria extrativa, em específico, como ferramenta de apoio a uma pedreira a céu aberto.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como fim avaliar a capacidade técnica e prática do uso de um veículo aéreo não tripulado, assim como identificar os benefícios da sua utilização nalgumas atividades de planeamento e gestão de operações mineiras e ambientais em pedreiras. Para isso, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

1. Fazer o levantamento topográfico com o VANT: planeamento e execução dos voos, aquisição de imagens e coleta de pontos de controlo no terreno;
2. Realizar o processamento dos dados capturados: criação de nuvens de pontos, mosaico de imagens e modelos digitais de superfície (MDS); avaliar a qualidade desses produtos com e sem pontos de controlo;
3. Proceder à extração de características dos mosaicos e do MDS e avaliação da sua utilização no apoio às operações da atividade extrativa: topografia, ajuda ao planeamento do desmonte, inventariação 3D de material em stock e monitorização ambiental.

1.3. Empresa parceira na realização do estudo

A presente dissertação teve como alvo de estudo a pedreira de calcário ornamental denominada Casal Farto nº3, explorada pela empresa Filstone - Comércio de Rochas, S.A, assim como a área envolvente das infraestruturas de apoio e a zona da unidade de britagem.

A pedreira Casal Farto nº3 pertence ao núcleo de pedreiras de Casal Farto e localiza-se na freguesia de Fátima, concelho de Ourém, no distrito de Santarém (Figura 1). As populações mais próximas da unidade extrativa são Casal Farto, a cerca de 500m, Maxieira a cerca de 1700m e Bairro a cerca de 2250m, conforme a Figura 2 (distâncias calculadas com recurso à ferramenta de cálculo de distâncias do Google Earth).

A pedra insere-se na morfologia típica do Maciço Calcário Estremenho, concretamente no extremo NE do maciço, a Norte da Serra de Aire, na transição para a unidade geomorfológica designada por Plataforma de Fátima. Esta zona apresenta uma rede complexa de estruturas cársticas em profundidade, que se expressam sob a forma de pequenas cavidades, algares, grutas e condutas de circulação de águas profundas.

A riqueza e diversidade da pedra Casal Farto nº3 permite à empresa disponibilizar 3 variedades diferentes de calcário ornamental, diferenciados segundo o tamanho do grão, a mineralogia, a cor e a disposição dos grãos na matriz rochosa, e representados nos 19 tipos de produtos ornamentais comercializados atualmente pela Filstone-Comércio de Rochas, S.A.

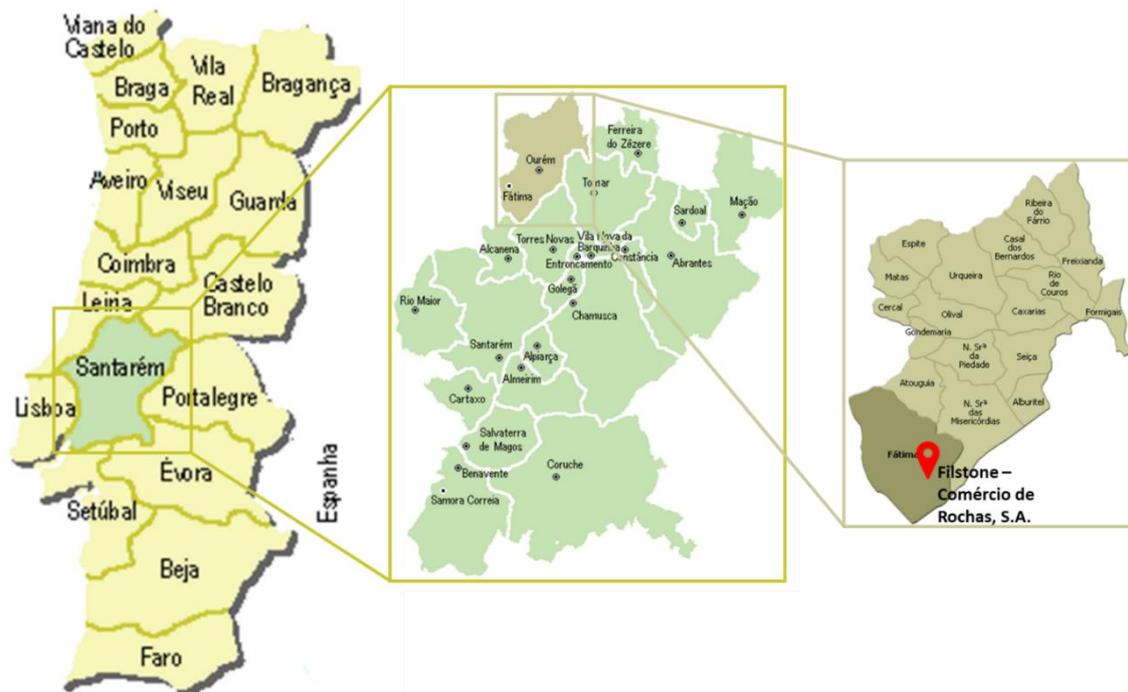


Figura 1: Localização da pedra explorada pela empresa Filstone – Comércio de Rochas, S.A, no mapa de Portugal.

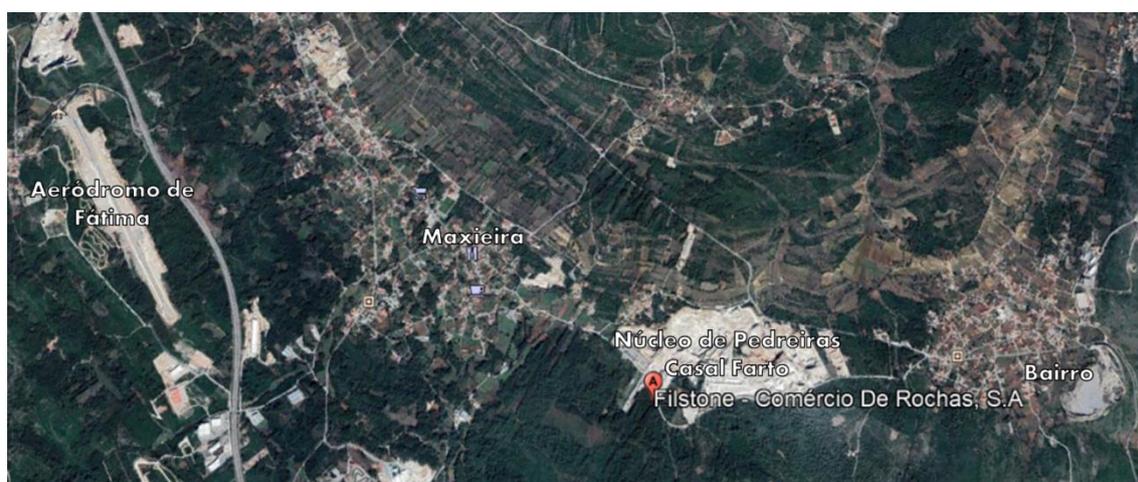


Figura 2: Localização geográfica da empresa Filstone - Comércio de Rochas, S.A. e do parque de blocos inserido no Aeródromo de Fátima (adaptado de Google Earth, acedido em março de 2021)

1.4. Organização do documento

A dissertação possui um total de cinco capítulos. No presente capítulo (1. Introdução) faz-se um enquadramento do tema de estudo e definem-se os objetivos do trabalho. O segundo capítulo (2. Revisão Bibliográfica) consiste na revisão de conhecimentos necessários para o desenvolvimento e compreensão do trabalho, tais como a definição de determinados termos específicos e a descrição do método de fotogrametria utilizado. No terceiro capítulo (3. Metodologia) faz-se uma descrição dos passos efetuados em cada etapa até obter os produtos finais. No quarto capítulo (4. Resultados e discussão) são apresentados os resultados obtidos a partir do processamento das imagens aéreas e faz-se a sua análise e discussão. Por fim, o quinto capítulo (5. Conclusões e trabalhos futuros) compreende as conclusões retiradas do estudo desenvolvido e são feitas sugestões para trabalhos futuros sobre o mesmo tema.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs)

Um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), também conhecido mundialmente como *Drone*, é uma aeronave que se destina a operar sem piloto a bordo, a qual tem a capacidade de operar autonomamente ou de ser pilotada remotamente (ANAC, 2016). Os VANTs são também denominados por RPAS, do inglês *Remotely Piloted Aircraft System*, que segundo a ANAC (2016), define uma aeronave não tripulada que é pilotada de uma estação de piloto remoto.

Um VANT é constituído por subsistemas que incluem o veículo aéreo, a estação de controlo, o sistema de suporte, comunicação e capacidade de carga e a navegação e controlo (Gondim, 2018). A arquitetura do VANT do tipo multi-rotor encontra-se representada na Figura 3 e é formada por: (Mantero, 2020)

- 1) Frame/Estrutura: é o esqueleto do drone, no qual estão implantados os componentes;
- 2) Bateria: a duração da bateria é variável consoante o modelo, mas tipicamente entre 10 a 25 min, em que a relação peso/capacidade maximiza a autonomia do voo;
- 3) Braços: podem ser 3, 4, 6 ou 8 braços dos quais irá depender a estabilidade do drone;
- 4) Motores: são os elementos que mantêm o drone no ar, ao girar as hélices. Os motores mais utilizados são os motores elétricos, mediante uma bobine pela qual circula corrente elétrica. Devemos analisar os motores regularmente e assegurarmo-nos que não têm pó e que não fazem ruído fora do normal.
- 5) GPS: permite conhecer a localização, altitude e velocidade exatas do drone;
- 6) Hélices: elevam e sustentam o multirotor. São giradas pela potência que os motores lhes transmitem. Quanto maior o comprimento da hélice, maior a estabilidade, no entanto maior é o consumo elétrico;
- 7) Controlador de voo: no qual estão conectados todos os componentes. É o “cérebro” da máquina, no qual se recolhem todos os dados do sistema, GPS, velocidades, informação de giroscópios e acelerómetros e comanda os movimentos do drone, recebendo as ordens que são enviadas, desde o solo, com o controlo remoto. Ao controlador de voo estão conectados vários sensores tais como: giroscópio, sensores de altitude e altura, sensores de variação de altura, bússola, sensores de velocidade, sensores de posição;
- 8) Câmara digital: sensor para capturar as imagens
- 9) Gimbal: elemento estabilizador móvel que une a câmara ao drone, aumentando a sua estabilidade e absorvendo as vibrações dos motores que afetam a câmara;
- 10) Estação de controlo: permite controlar o drone de maneira remota, interpretando os movimentos que exerce o piloto sobre os seus *joysticks*. Conta com três elementos: o emissor/recetor de sinal, que envia ao drone as informações para o controlo do voo e recebe os dados dos sensores mediante os sinais de rádio através de uma antena, os elementos de controlo que permitem controlar os motores e restantes elementos que influenciam o voo e

elementos de visualização e gestão de dados, que processam os dados de posicionamento e telemetria e mostram a informação referente ao voo.

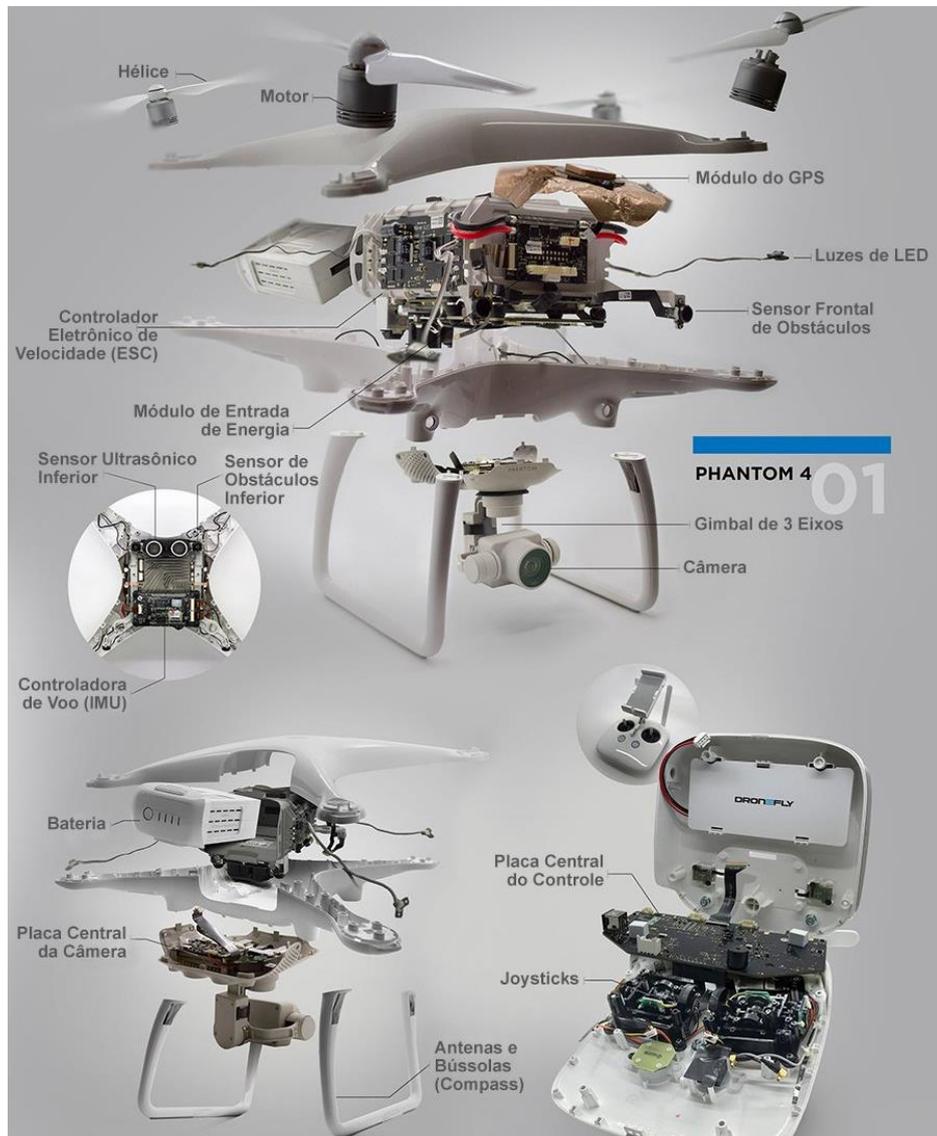


Figura 3: Partes constituintes de um drone multi-rotor (Adaptado de FlyPro, 2020)

2.2. História dos VANTs

Apresenta-se seguidamente um breve resumo histórico da origem e evolução dos VANTs, desde o século XIX até à atualidade.

Os primeiros veículos aéreos não tripulados foram idealizados inicialmente para fins militares (Metcalf, 2013). Acredita-se que a origem dos VANTs remota a 1849, quando o exército austríaco utilizou balões carregados de explosivos para atacar a cidade de

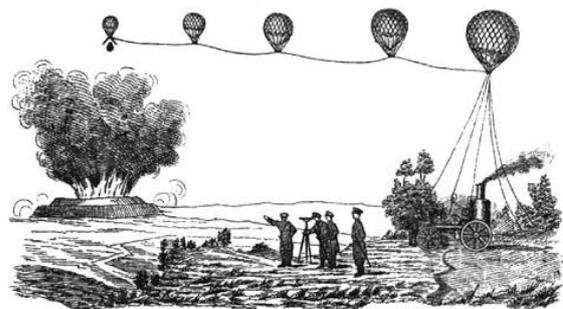


Figura 4: Balões Australianos utilizados no ataque a Veneza, a 22 de Agosto de 1849 (CTIE, 2003)

Veneza (Figura 4). No entanto, esses balões não atendem à definição atual de VANT, referida anteriormente.

1915-1920



Figura 5: Primeiro VANT americano Kettering Bug (Hunt, 2017)

Em 1915, os militares britânicos usaram a fotografia aérea como vantagem na Batalha de Neuve Chapelle, tendo capturado mais de 1500 fotos aéreas das fortificações das trincheiras alemãs na região (Daly, s.d.). Em 1916, durante a Primeira Guerra Mundial, os Estados Unidos começaram a desenvolver a tecnologia VANT, tendo criado a primeira aeronave sem piloto, Kettering Bug (Figura 5), com o objetivo de ser usado como torpedo aéreo (Vyas, 2018).

1930-1945

Em 1930 a Marinha dos EUA começou a experimentar aeronaves controladas por rádio, o que resultou na criação do VANT Curtiss N2C-2 em 1937. Simultaneamente, em 1935 os britânicos desenvolveram um alvo controlado por rádio Queen Bee que se acredita também ter levado ao uso do termo VANT (Vyas, 2018). Durante a Segunda Guerra Mundial, Reginald Denny criou a primeira aeronave controlada remotamente chamada de Radioplane OQ-2 (Figura 6). Este tornou-se o primeiro produto VANT produzido em massa nos EUA, tendo sido fabricados cerca de 15 000 unidades para o exército durante a guerra.



Figura 6: Radioplane OQ-2 (Wilson, 2020)

1980-1989



Figura 7: Pioneer QR-2 (wikipedia, 2021)

Embora os EUA tenham conseguido uma inovação no fabrico em massa e no fornecimento de VANTs para os militares, estes eram frequentemente considerados não confiáveis e caros. No entanto, essa perspectiva mudou em 1982, quando a Força Aérea de Israel usou VANTs e aeronaves tripuladas para destruir uma dúzia de aeronaves sírias com perdas mínimas.

Além disso, em 1980 os EUA criaram o Programa VANT da Pioneer para construir um veículo aéreo não tripulado barato para operações de frota. Em 1986, um projeto conjunto dos EUA com o Israel levou ainda ao desenvolvimento do RQ2 Pioneer (Figura 7), um avião de reconhecimento de tamanho médio (Vyas, 2018). Também nesta época, o engenheiro aeroespacial Abraham Karem desenvolveu o protótipo do GNAT 750, tendo sido adquirido pela empresa de projetos de defesa General Atomics (thecasefarm, s.d.).

1990-2010

O período de 1990 a 2010 foi crucial para o desenvolvimento de VANTs tanto para fins militares, como para uso civil.

Durante a Guerra do Golfo, os VANTs tornaram-se parte integrante das operações americanas sendo que, durante o dia, existia sempre pelo menos um VANT no ar (thecasefarm, s.d.). Neste período foram criadas versões mini e micro de VANTs como ferramenta de apoio às operações militares (Vyas, 2018). No ano 2000, os EUA otimizaram o modelo GNAT 750, tornando-o mais silencioso e mais resistente,



Figura 8: Predator RQ-1/MQ-1 (wikipedia, 2021)

originando o famoso *Predator* (Figura 8), usado no Afeganistão para procurar Osama Bin Laden (Vyas, 2018; thecasefarm, s.d.).

Nos anos seguintes, com o reconhecimento do potencial da utilização de VANTs em diversas aplicações do campo militar e não-civil, a FAA emitiu as primeiras licenças comerciais, criando novas possibilidades para empresas governamentais e privadas, destacando-se como principais aplicações o apoio ao resgate, vigilância, combate a incêndios, inspeção e agricultura (Dronethusiast, s.d.).

Desde 2010

Embora muitos dos desenvolvimentos de VANTs mais notáveis tenham sido para fins militares, a tecnologia continuou a avançar e a receber bastante mais atenção da sociedade civil, rumo à sua maior acessibilidade e de forma a fornecer múltiplos benefícios, tanto para o mercado de drones, como para os seus consumidores. Hoje em dia, os drones possuem uma versatilidade enorme e uma maior facilidade operacional, sendo utilizados numa enorme quantidade de áreas de aplicação como por exemplo:

- Monitorização, vigilância e resgate;
- Fotografia e filmagem;
- Operações militares;
- Estudo da biomassa, monitorização da biodiversidade e conservação e gestão ambiental;
- Agricultura de precisão (acompanhamento das plantações, deteção de secas e pragas, estimativas de produtividade, mapeamento hídrico e pulverização de pesticidas);

- Restituição de monumentos históricos e sítios arqueológicos;
- Restituição de superfícies anatômicas para apoio à biomedicina, recolha de amostras em áreas de risco e deteção de focos de incêndios;
- Acompanhamento de obras de engenharia civil e inspeção de estruturas (como por exemplo, oleodutos, linhas de alta tensão; eólicas, pontes e painéis solares);
- Cartografia e topografia (realização de mapas topográficos e mapas temáticos, medição de volumes e monitorização de taludes);
- Investigação ártica (monitorização de icebergs, análise do impacto das alterações climáticas e deteção de mudanças nos ecossistemas), monitorização da atividade vulcânica e acompanhamento da erosão costeira;
- Medição e monitorização da radiação e da concentração de gases e poeiras.

O uso de VANTs tem aumentado imenso nesta última década, prevendo-se que continuará a crescer bastante em muitos setores da atividade económica.

2.3. Tipos de VANTs

Atualmente, o mercado apresenta uma vasta gama de VANTs com diferentes modelos equipados com variados sensores de modo a desempenhar diversas funções.

Existem dois principais tipos de VANTs, conforme podemos observar na Figura 9, os modelos com asa fixa e os modelos multirotores (HORUS, 2020). Os VANTs de asa fixa assemelham-se a aos aviões comuns, apresentando uma estrutura estática de asas. Deste modo, o sistema de lançamento ocorre em geral com o auxílio de uma catapulta ou manualmente, sendo necessário uma certa distância para descolagem, enquanto a aterragem ocorre de maneira linear (“de barriga”) ou com a ajuda de um paraquedas, o que dificulta a sua utilização em áreas pequenas. Os VANTs de asa fixa têm longa resistência e elevada velocidade de voo, o que lhes permite realizar uma grande variedade de tarefas em áreas mais extensas. No entanto, suportam uma carga útil pequena e são mais suscetíveis ao vento durante a descolagem e aterragem (Hu et al., 2019). Por sua vez, os drones multirotores funcionam como um mini helicóptero, na qual a descolagem e a aterragem ocorrem na vertical, o que lhes permite efetuar missões em áreas menores ou em ambientes fechados (HORUS, 2020). No entanto, a sua autonomia de voo também é em geral menor. Esta é a categoria mais popular do VANT, são em geral mais baratos do que os modelos de asa fixa, e são também amplamente utilizados em produções de cinema, ações publicitárias, inspeções na área civil e em atividades recreativas. Uma das vantagens do drone multirotor é o facto de poder capturar mais facilmente imagens de vários ângulos de forma a obter diferentes perspetivas de um alvo (Hu et al., 2019).



Figura 9: VANTs de asa fixa (à esquerda) e multirotores (à direita) (adaptado de Hu et al, 2019)

2.4. Sensores acoplados nos VANTs

Existem variados sensores que podem ser colocados nos VANT, dividindo-se estes em dois principais tipos, de acordo com a sua ação: sensores ativos e passivos. O sensor passivo é um sensor de energia eletromagnética, como uma câmara digital que coleta a energia da luz solar refletida pelos próprios alvos do solo em diferentes comprimentos de onda. O sensor ativo emite energia eletromagnética para o alvo no solo e de seguida recolhe a energia refletida, como é o caso dos sensores LiDAR (Light Detection and Ranging) ou SAR (Synthetic Aperture Radar) (Hu et al, 2019).

A Figura 10 apresenta os principais intervalos do espectro da radiação eletromagnética, sendo que as bandas mais utilizadas nos sensores acoplados nos VANTs são: visível (390-750nm), *red-edge* (690-730nm), NIR (750-1300nm), LiDAR (700×10^5 nm) e TIR ($2500-10^6$ nm).

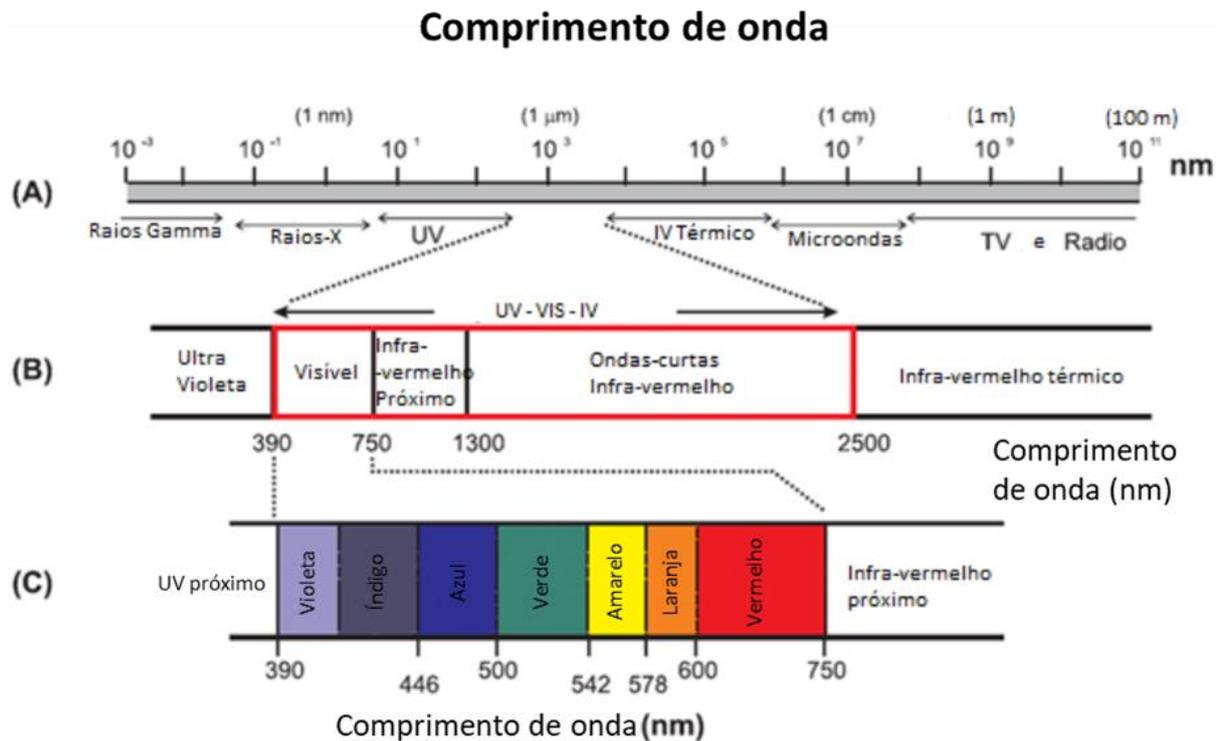


Figura 10: Espectro da radiação eletromagnética (adaptado de Kerr et al., 2011)

A câmara digital corresponde às câmaras fotográficas convencionais que permitem capturar imagens em cores reais. Este tipo de câmaras possui o sistema de cores RGB (*Red, Green and Blue* / vermelho, verde e azul), que corresponde aos comprimentos de onda de 400-760nm do espectro do visível (Figura 10). Os VANTs equipados com câmaras digitais permitem captar imagens de muito elevada resolução espacial (a distância de amostragem ao solo GSD, isto é, a distância entre os centros dos pixels medidos no solo, pode atingir o valor de 1cm/pixel, apresentando em média, uma resolução de 4 a 7 cm/pixel) da área em estudo, o que torna possível a realização de mosaicos de imagem com elevado nível de detalhe (Fernandes & Grubert, s.d.). Esta abordagem tem sido amplamente utilizada para calcular volumes de escavações em minas a céu aberto, bem como avaliar a estabilidade de taludes ou monitorizar obras de construção (Hu et al., 2019).

A câmara multiespectral possui múltiplos sensores de modo a capturar também o que não é sensível ao olho humano, que só capta a energia no domínio do visível. As câmaras multiespectrais têm uma lente e um sensor separados, fornecidos com filtros de diferentes comprimentos de onda, tais como vermelho, verde, azul, infravermelho próximo e *red-edge*. Este tipo de câmaras tem uma grande relevância para identificar vegetação, pois é um excelente detetor da presença de clorofila, assim como identificar o grau de maturidade ou doenças em culturas e espécies invasoras, e também estudar alguns tipos de rochas ou solos (Hu et al., 2019).

O LiDAR é um sistema ativo de observação do solo, no qual um laser é transmitido até à superfície ou objeto e é refletido para o sensor. A distância é calculada pela diferença temporal entre a emissão e a receção do sinal. O LiDAR é muito preciso e consegue adquirir rapidamente dados 3D com muito

elevada densidade espacial e em tempo real. Pode penetrar parcialmente através da copa das árvores e de arbustos e plantas menos densas para obter informação 3D precisa da superfície sendo também muito útil para a previsão da densidade, altura e biomassa das árvores (Hu et al., 2019).

As câmaras TIR utilizam sensores que captam imagens com comprimento de onda na banda do infravermelho térmico e têm sido amplamente utilizadas em monitorização agrícola, prospeção geológica, estado hídrico, doenças de culturas, áreas geotérmicas e fluxos de calor.

Atualmente, os VANTs podem também ser equipados com sensores de amostragem de gases de modo a analisar as concentrações de, por exemplo, metano (CH₄) e dióxido de carbono CO₂ assim como de aerossóis do tipo PM₁₀, de forma a avaliar o risco de saúde pública e ambiental (Hu et al., 2019).

2.5. Aplicação dos VANTs na Indústria Extrativa

As vantagens da utilização dos veículos aéreos não tripulados, tais como a rapidez e baixo custo de aquisição, têm sido exaustivamente exploradas por vários sectores. O mesmo não acontece ainda quando falamos da indústria extrativa, continuando a prevalecer os levantamentos tradicionais de dados, mais limitados no tempo e na segurança, que, muitas vezes, não permitem obter informação completa para a monitorização e avaliação. O baixo custo, a alta precisão e a eficiência notável no tempo possibilitam que os VANTs se tornem num método confiável de aquisição de dados na indústria extrativa, tanto a pequenas como a grandes escalas, com erros correspondentes inferiores a poucos centímetros. As principais atividades nesta área concentram-se maioritariamente na modelação 3D e no levantamento do terreno, mas também na monitorização ecológica, geológica e faunística (Hu et al., 2019).

Levantamento de terreno e modelação 3D

A aquisição de dados 3D georreferenciados de alta precisão é um impulsionador de avanços futuros, para a melhoria da eficiência da mineração e da previsão de riscos geológicos. Os métodos tradicionais utilizam uma estação total para obter dados do terreno e criar mapas através de software CAD, com a definição de um sistema de coordenadas específico após a aquisição de coordenadas tridimensionais de determinados pontos no terreno. No entanto, a duração elevada para a realização do levantamento, dificulta a caracterização de mudanças drásticas no ambiente extrativo. Contrariamente, a tecnologia LiDAR terrestre ou TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) permite adquirir um modelo digital de elevação preciso e num curto espaço de tempo porém, trata-se de um método caro, o que não o torna num método popular para o trabalho de mineração (Chen et al., 2015; Sayab et al., 2018). Comparativamente, o VANT é relativamente mais barato e tem uma ampla aplicabilidade, permitindo adquirir e construir produtos tais como nuvens de pontos, modelos digitais de superfície e imagens mosaico ortorretificadas, através de câmaras digitais comuns. Além da aquisição de dados, já existem

diversos algoritmos robustos de processamento rápido, desenvolvidos e incorporados nalguns tipos de software de fotogrametria, baseados em SfM, como o Agisoft PhotoScan e o Pix4D (Rumpler et al., 2017).

Atualmente, os VANTs equipados com câmaras digitais começam a ser utilizados mais regularmente na indústria extrativa para o levantamento de terrenos, medição de volumes de terraplenagem, reconstrução tridimensional, monitorização de declives e riscos geológicos (Hu et al, 2019).

Avaliação de danos no solo e monitorização ambiental

Apesar dos benefícios económicos, a indústria extrativa causa também sérios danos ao solo e ao meio ambiente. A escavação e o colapso das terras causadas pela exploração a céu aberto e subterrânea são manifestações diretas decorrentes da atividade mineira. No entanto, outras formas de danos provocam o desequilíbrio da hidrologia e das condições geológicas, tais como as mudanças na microgeomorfologia, na vegetação, no solo e no sistema de escoamento de água.

Quando equipados com diversos sensores, os VANTs mostram grande potencial na identificação de áreas que sofreram subsidência, no mapeamento preciso de minerais de ferro na drenagem ácida de minas, caracterização de pântanos afetados pela mineração subterrânea de carvão, mapeamento e identificação de minas de urânio e monitorização de lagos de minas.

A avaliação dos danos ao meio ambiente envolvente é também uma parte importante de proteção da atividade extrativa e a base para a seleção de diferentes abordagens de gestão nas fases posteriores, após a cessação da atividade extrativa (Hu et al, 2019).

Riscos geológicos e monitorização da poluição

Durante o tempo de vida da exploração mineira, é também fundamental monitorizar as fontes de poluição, como a queima de combustíveis fósseis e conseqüente libertação de gases poluentes e a produção de poeiras devido ao método extrativo, que podem afetar a saúde das populações vizinhas, causar chuvas ácidas e gerar desequilíbrios ecológicos no meio envolvente (Dunnington & Nakagawa, 2017; Miguel et al., 2015). Por exemplo, nos últimos anos, os VANTs equipados com sensores de gases alcançaram bons resultados na monitorização e controlo de poluentes atmosféricos (Dunnington & Nakagawa, 2017; Martin et al., 2015).

Para além dos impactos ambientais, existem também riscos geológicos que devem ser monitorizados, tais como taludes instáveis e fissuras no solo que comprometem seriamente a segurança da produção. Estudos recentes demonstraram que os VANTs podem fornecer dados e monitorizar com rapidez a estabilidade de taludes (Haas et al., 2016; Francioni et al., 2015; Salvini et al., 2018) e zonas de exploração em minas a céu aberto.

2.6. Legislação portuguesa para a operação de VANTS

Para operar um VANT no espaço aéreo português, é necessário seguir as normas definidas no Regulamento n.º 1093/2016, de 14 de dezembro, que aprova as condições de operação aplicáveis à utilização do espaço aéreo pelos sistemas de aeronaves civis pilotadas remotamente (drones), no Decreto-Lei n.º 58/2018, de 23 de julho, que estabelece um sistema de registo e seguro de responsabilidade civil obrigatório aplicável aos sistemas de aeronaves civis não tripuladas (drones) e na Portaria n.º 2/2021, de 4 de janeiro, que estabelece as coberturas, condições e capitais mínimos aplicáveis ao seguro de responsabilidade civil previsto no artigo 10.º do Decreto-Lei n.º 58/2018, de 23 de julho, a celebrar pelos operadores de aeronaves civis não tripuladas (ANACOM, 2021).

No dia 31 de dezembro de 2020 entrou também em vigor o novo Regulamento da EU 2019/947, da Agência Europeia de Segurança Aérea (EASA), que regulariza os espaços aéreos da União Europeia, Islândia, Noruega e Reino Unido, de forma a melhorar a segurança. O novo regulamento europeu distingue três categorias diferentes: categoria aberta, categoria específica e categoria certificada.

A Categoria Aberta inclui os voos de baixo risco para os quais não é necessária autorização ou declaração prévia do operador e está dividida em três subcategorias com base nas limitações operacionais, requisitos para pilotos e requisitos técnicos do VANT, conforme pode ser consultado na Figura 11.



Figura 11: Requisitos gerais de operação da Categoria Aberta (Skyphoto, 2021)

O novo regulamento europeu determina que a categoria específica se aplique às operações que não se enquadram na categoria aberta devido às questões de risco operacional e encontra-se resumida na Figura 12.

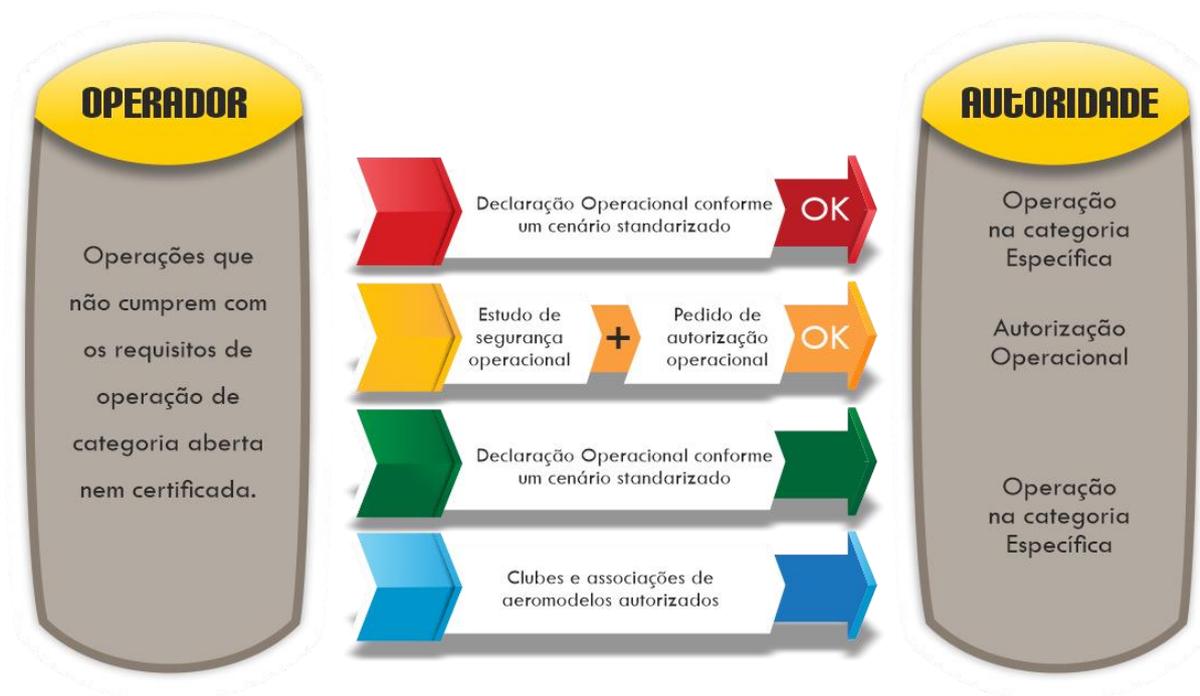


Figura 12: Requisitos de operação na Categoria Específica (Skyphoto, 2021)

Os requisitos gerais para operações incluídas na categoria certificada são os seguintes: drones certificados de acordo com o Regulamento Delegado da UE 2019/945, drones que sobrevoam aglomerações de pessoas, transportem mercadorias perigosas com alto risco em caso de acidente, transporte de pessoas e caso o Estudo de Segurança (SORA) apresentado, indicar a necessidade de certificação UAS e a obtenção da licença de piloto relevante (Skyphoto, 2021).

2.7. Fotogrametria: Definição e conceitos

Fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia de obter informações sobre objetos físicos e o ambiente por meio de registo, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante (Wolf & Dewitt, 2000; McGlone, 2004).

A fotogrametria divide-se em três grupos, consoante a localização do sensor, sendo estes: fotogrametria terrestre, fotogrametria aérea e fotogrametria orbital. Na fotogrametria terrestre são utilizadas fotografias obtidas por estações fixas e de posições conhecidas sobre o terreno, com o eixo ótico da câmara próximo da horizontal ou oblíquo; na fotogrametria aérea as fotografias do terreno são captadas por uma câmara de precisão acoplada a uma plataforma aérea, com o eixo ótico da câmara na vertical ou oblíquo; a fotogrametria orbital começa a ter crescente utilização e envolve o processamento de imagens de satélite de alta resolução (Brito e Coelho, 2002). Podemos citar como

exemplos, o tripé, o veículo aéreo não tripulado e o satélite como equipamentos que representam cada um dos tipos, respetivamente (Gondim, 2018).

A fotogrametria tem como objetivo principal a reconstrução precisa de objetos tridimensionais (espaço objeto), representados pelas coordenadas do terreno, a partir de fotografias bidimensionais (espaço imagem), definidas pelas coordenadas de calibração da câmara. Para esta transformação é necessária a utilização de pontos de controlo no espaço objeto que, uma vez alocados no espaço imagem, fornecem parâmetros de relação entre os dois sistemas (Júnior, 2011)

Os pontos de controlo no terreno (GCP, do inglês *Ground Control Point*) são pontos de referência no solo, definidos com um GPS de alta precisão (Recetor GNSS) que regista as suas coordenadas exatas de modo a corrigir os erros que possam surgir durante a fase de processamento das imagens. Os pontos de controlo devem ser facilmente identificáveis nas fotografias e podem ser alvos naturais, como pequenas estruturas existentes no terreno, ou artificiais, como marca pintada no chão (por exemplo, uma cruz) ou pequenos marcadores facilmente transportáveis (por exemplo, quadrados de papel impermeável). Esta abordagem é utilizada para depois, no processamento, aumentar a exatidão e posicionamento do mapeamento gerado.

A exatidão é uma medida da proximidade entre um valor que se obtém experimentalmente e o valor real (Junior et al., 2013). Em termos de mapeamento, a exatidão define a qualidade do posicionamento geográfico do mapa. Um mapa pode ter alta precisão, mas as suas coordenadas de latitude e longitude estarem distanciadas do seu valor real, apresentando assim uma baixa exatidão (HORUS, 2020). A precisão define o grau de variação dos valores obtidos experimentalmente, de forma consecutiva, de uma mesma grandeza (Junior et al., 2013). A Figura 13 apresenta a diferença entre exatidão e precisão com exemplos de alvos, que são totalmente transponíveis para os levantamentos topográficos.

Quando se fala em levantamento aéreos, surgem também dois tipos de precisão: a precisão geográfica e a precisão das medições. A precisão geográfica/espacial é baseada nas coordenadas geográficas de GPS e representa o espaço e os fenómenos que nela ocorrem. A precisão das medições refere-se às coordenadas resultantes dos processamentos efetuados (HORUS, 2020).

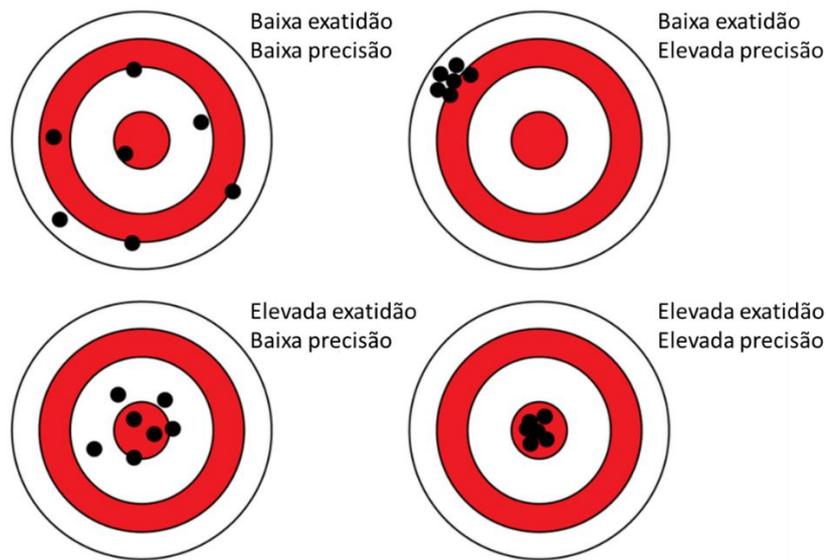


Figura 13: Diferença entre exatidão e precisão (baseado em Ruotsala, 2020)

2.7.1. Fotogrametria Aérea

Como referido anteriormente, a fotogrametria aérea, também designada por aerofotogrametria, é uma subdivisão da fotogrametria na qual as fotografias são capturadas por uma câmara instalada num veículo aéreo. Santos (2010) afirma que a aerofotogrametria se baseia no princípio de visão ocular do ser humano (Figura 14) que, por ser um sistema binocular, visualiza a profundidade dos objetos no espaço físico e permite determinar as coordenadas tridimensionais de pontos sobre a superfície terrestre. Este processo é denominado de estereoscopia. Segundo Santos (2010), estereoscopia é um fenómeno natural que ocorre quando se observam simultaneamente duas imagens fotográficas de uma mesma cena, tomadas a partir de duas estações diferentes, com as devidas sobreposições, dando uma sensação de profundidade.

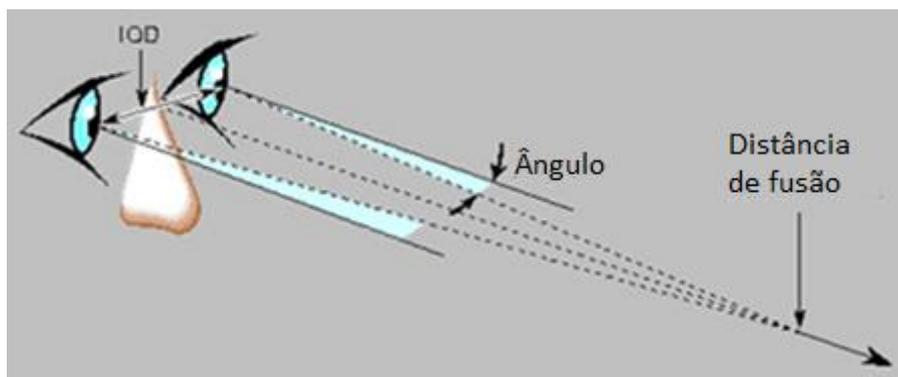


Figura 14: Imagem exemplificando o processo de estereoscopia através dos olhos humanos (adaptado de DronEng, 2021)

Tal como na fotogrametria, as fotografias são obtidas em série, ao longo de uma faixa de voo, com sobreposição longitudinal e lateral em relação às fotografias adjacentes (Figura 15), possibilitando

posteriormente a reconstrução tridimensional dos objetos ou a medição das suas posições planimétricas e altimétricas. Este princípio denomina-se por recobrimento estereoscópico (sobreposição) entre duas fotografias (Júnior, 2011). O recobrimento de uma área com imagens aéreas para fins de formar pares estereoscópios utiliza geralmente valores de 60% de sobreposição longitudinal e de 30 % de sobreposição lateral das imagens (Gondim, 2018). No entanto, os softwares mais recentes de fotogrametria baseados na técnica SfM, tal como Pix4DMapper ou Agisoft Metashape, aconselham valores não inferiores a 70% de sobreposição lateral e 80% de sobreposição longitudinal de forma a obter os melhores resultados.

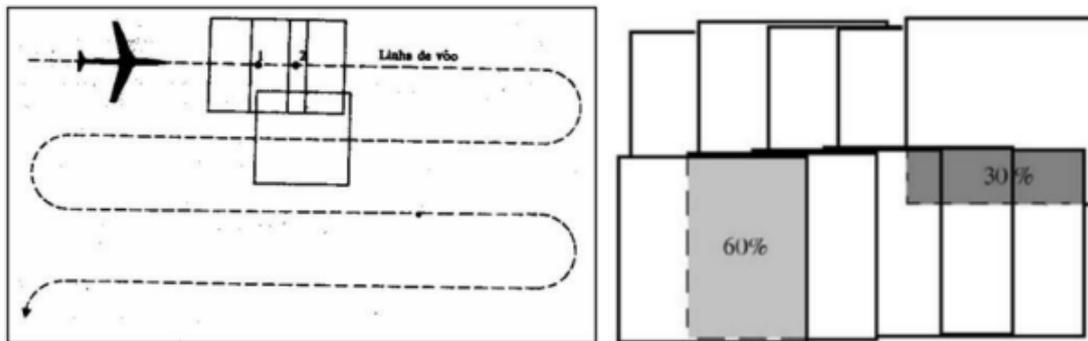


Figura 15: Plano de sobreposição de imagens (baseado em Gondim, 2018)

Também a resolução espacial ou distância entre pontos de amostragem do solo ou superfície (GSD, do inglês *Ground Sampling Distance*) influencia a precisão e a qualidade dos resultados, bem como os detalhes visíveis no ortomosaico final, uma vez que representa a distância entre o centro de dois pixels consecutivos no solo. A altura de voo H necessária para obter um determinado GSD depende da distância focal da câmara, da largura do sensor [mm] e da largura da imagem [pixels]. Alguns fabricantes dão a distância focal F_{35} como uma equivalência à distância focal de 35mm, sendo necessário calcular a distância focal real. Para as imagens com uma razão 4:3 nas suas dimensões, a distância focal real F_R [mm] é dada por (Pix4DMapper,2017):

$$F_R = \frac{F_{35} \times S_W}{34.6} \quad (1)$$

Onde F_{35} [mm] é a distância focal que corresponde ao equivalente a 35mm e S_W [mm] é a largura real do sensor.

Pela observação da Figura 16, temos a seguinte relação:

$$\frac{H}{F_R} = \frac{D_W}{S_W} \quad (2)$$

Onde H [m] é a altura de voo, F_R [mm] é a distância focal real, D_W é a distância percorrida no solo por uma imagem na direção da largura [m] e S_W [mm] é a largura real do sensor. Deste modo, a altura de voo H [m] é dada por:

$$H = \frac{D_W \times F_R}{S_W} \quad (3)$$

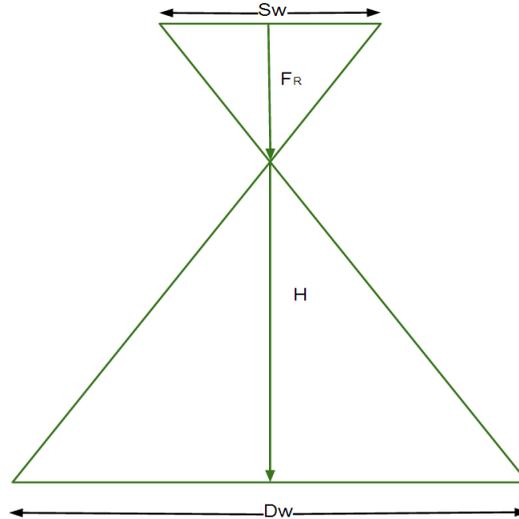


Figura 16: Relação entre a altura de voo, distância focal real, largura real do sensor e distância percorrida no solo pelo VANT (baseado em Pix4DMapper, 2017)

A distância percorrida no solo por uma imagem na direção da largura é definida por (Pix4DMapper, 2017):

$$D_W = \frac{imW \times GSD}{100} \quad (4)$$

Onde D_W [m] é a distância percorrida no solo por uma imagem na direção da largura, imW [pixel] é a largura da imagem e o GSD [cm/pixel] pretendido.

Combinando as equações 3 e 4 resulta:

$$H = \frac{imW \times GSD \times F_R}{S_W \times 100} \quad (5)$$

A taxa de captura de imagem para obter uma determinada sobreposição frontal depende da velocidade do VANT, do GSD pretendido e da resolução de pixels da câmara, conforme a relação representada na Figura 17.

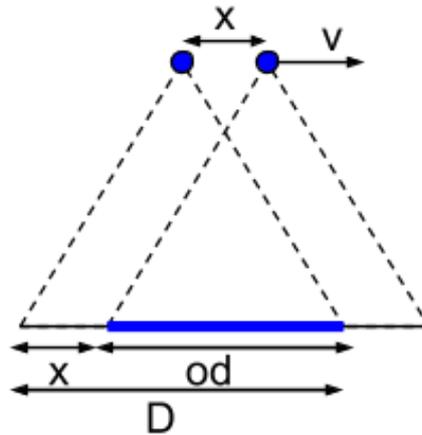


Figura 17: Relação entre a sobreposição frontal das imagens od , a distância percorrida no solo D , a velocidade de voo v e a distância entre duas fotografias consecutivas x (baseada em Pix4DMapper, 2017)

A partir da figura 17 obtemos as seguintes equações:

$$od = \% \text{ sobreposição} \times D \quad (6)$$

$$x = D - od \quad (7)$$

$$t = \frac{x}{v} \quad (8)$$

Onde od [m] é a sobreposição entre duas imagens na direção do voo, % sobreposição é a percentagem de sobreposição frontal desejada entre duas imagens, D [m] é a distância percorrida no solo por uma imagem na direção do voo, x [m] é a distância entre duas posições da câmara na direção do voo, t [m/s] é o tempo decorrido entre duas imagens e v é a velocidade de voo.

Uma vez que a área de interesse está totalmente coberta por imagens, com o processo descrito em cima, dá-se início à tarefa de processamento estereoscópico digital, com o objetivo de reconstruir um modelo tridimensional da área de estudo. A metodologia utilizada para a obtenção das imagens e seu consequente processamento, com vista à obtenção de nuvens densas de pontos, malhas texturizadas 3D, modelos digitais de superfície (MDS) e ortofotos, encontra-se descrita no capítulo seguinte.

3. Materiais e Métodos

Este capítulo descreve a metodologia desenvolvida para efetuar os levantamentos VANT, processar os dados e obter a informação de base (nuvens de pontos, ortofotos e modelos digitais de superfície) que serve de base ao estudo de problemas mineiros e ambientais (cálculo de volumes, identificação de rede de drenagem e avaliação do impacto de poeiras).

3.1. Metodologia

A maior parte da literatura descreve de uma forma muito semelhante os passos para transformar fotografias aéreas nos principais produtos finais (MDS e ortofoto), sendo que as principais diferenças correspondem às ferramentas utilizadas (plataforma aérea, tipo de câmara, softwares de processamento de imagens ou algoritmos), precisão (tipo de aplicação, GPS RTK, resolução de pixels, precisão posicional e altura) e estratégias (georreferenciamento direto ou aereotriangulação, *bundle adjustment*, modelos de calibração da câmara) que dependem do ambiente operacional, tempo do projeto, orçamento e experiência do operador (Pucino, 2015). A geração automática de MDS a partir de rotinas de imagens aéreas orientadas e calibradas tem sido utilizada por investigadores há mais de 20 anos (Krzystek, 1991; Colomina & Molina, 2014), o que tem levado à concepção de um procedimento robusto e bem estabelecido para a fotogrametria digital SfM moderna.

A tecnologia aplicada para a obtenção destes produtos vem da área de investigação da visão computacional, que desenvolve técnicas para recuperar a forma tridimensional e a aparência dos objetos em imagens e utiliza técnicas tais como SfM e MVS (Rodrigues, 2016). Para facilitar a compreensão da metodologia aplicada neste trabalho, é apresentado na Figura 18 um fluxograma resumindo as etapas realizadas desde a recolha dos dados até à obtenção do produto final.



Figura 18: Fluxograma resumindo a metodologia aplicada para se chegar ao produto final

Antes de se dar início ao processo de reconstrução 3D dos dados 2D recolhidos na fase de trabalho de campo (imagens digitais e coordenadas dos GCPs), é necessário efetuar um pré-processamento do bloco de trabalho, no qual se adicionam as fotografias capturadas durante o voo, define-se o sistema de coordenadas do projeto, removem-se as fotografias desfocadas e identificam-se os pontos característicos correspondentes entre as imagens. Nesta etapa inicial, recorre-se à aerotriangulação, um processo de pesquisa de pontos conjugados em diferentes fotografias, que irá aumentar a rede de pontos de apoio no bloco de fotografias, de forma a conhecer em cada fotografia as coordenadas do terreno. Estes pontos vão servir de ligação entre fotografias e fiadas adjacentes, designando-se por pontos de ligação (*Tie Points*). A exatidão geométrica e posicional do projeto pode ser otimizada pela inserção dos pontos de controlo na superfície ou no solo (GCP-*Ground Control Points*) georreferenciados nesta etapa.

O processo de reconstrução 3D utilizado neste estudo, para o conjunto de imagens fotográficas capturadas utilizando o VANT e a partir de câmaras digitais de pequeno formato, não-métricas e não pré-calibradas, é possível devido à criação da técnica computacional *Structure from Motion* (SfM). O termo SfM é derivado da expressão *structure derived from a moving sensor*, ou estrutura derivada de um sensor em movimento, o que ocorre diante da necessidade de dispor de uma grande quantidade de imagens tomadas em diferentes posições e com alta sobreposição entre elas, para permitir a reconstrução tridimensional de uma cena ou objeto (Micheletti et al., 2015). O método SfM estima, a partir da correspondência entre imagens, a calibração das câmaras (ou mais concretamente, da mesma

câmara em diferentes posições), com base nos parâmetros de orientação internos e externos, de forma a gerar uma nuvem esparsa de pontos (Szeliski, 2010).

A orientação e a posição da captura das imagens (determinada pelo sistema de posicionamento inercial a bordo do veículo aéreo) assim como a calibração da câmara (distorções geométricas internas da câmara) são determinadas utilizando-se o algoritmo *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT), que identifica automaticamente pontos ou padrões homólogos em pares de imagens sobrepostas entre si para estabelecer uma correlação espacial entre as imagens num sistema de coordenadas tridimensional, resultando uma representação insensível a variações de iluminação e orientação. A existência de um sistema GNSS/IMU a bordo do VANT permite ao algoritmo executar a tarefa com uma maior velocidade, uma vez que ao indicar ao software qual a sequência correta das imagens, faz com que o mesmo não tente identificar correspondências entre imagens que não tenham pontos em comum. De seguida, o procedimento *Sparse Bundle Adjustment* transforma os pontos homólogos identificados (*Tie Points*) nas imagens num modelo geométrico tridimensional da cena em forma de uma nuvem esparsa de pontos (AGISOFT LLC, 2016; Lowe, 2004).

Posteriormente, as imagens orientadas e calibradas são processadas recorrendo a técnicas *Multi View Stereo* (MVS), que utilizando como entrada as orientações e localização das câmaras modeladas, realizam uma busca sistemática para encontrar as melhores correspondências de pixels em todos os conjuntos sobrepostos dos pontos de características-chave, executando assim uma abordagem de correspondência, expansão e filtragem, criando uma nuvem densa de pontos com elevado nível de detalhe da geometria tridimensional da cena (Harwin e Lucieer, 2012; Bemis et al., 2014).

A nuvem densa de pontos é depois utilizada na reconstrução da geometria do objeto em forma de superfície, a partir da qual pode ser gerada a ortofoto e o modelo digital de elevação (AGISOFT LLC, 2016). A figura 19 apresenta o processo de obtenção dos produtos fotogramétricos, desde o pré-processamento até à obtenção da ortofoto.

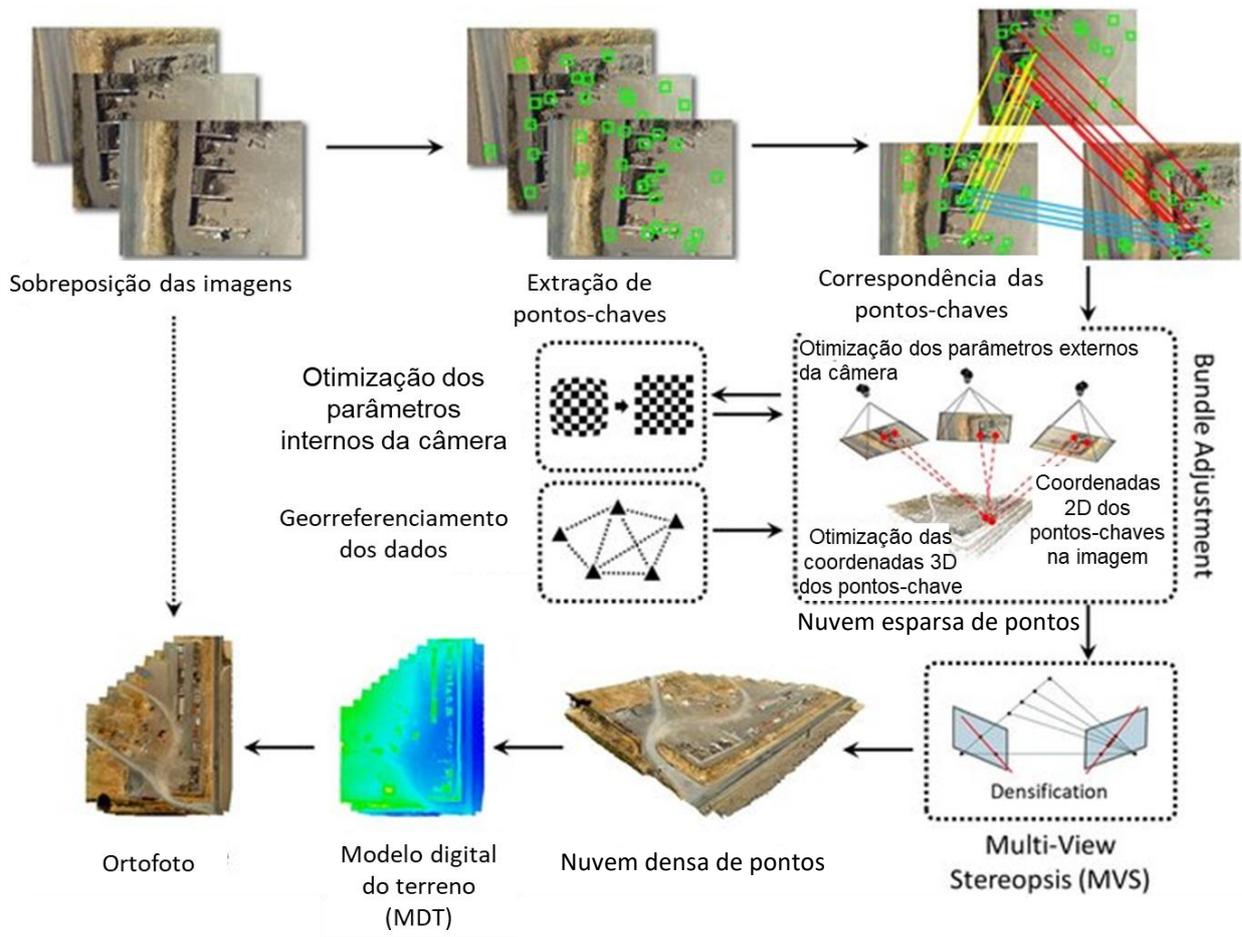


Figura 19: Etapas do processo de obtenção dos produtos fotogramétricos ortofoto e modelo digital de terreno (MDT) (adaptado de Gillians et al.,2021).

3.1.1. Medição de Volumes

As estimativas de volume são uma parte fundamental de muitas indústrias, pelo que a capacidade de o fazer de forma rápida e precisa é essencial para garantir a qualidade dos resultados e a eficiência dos custos. Dada a relevância do cálculo do volume, é importante adaptarmo-nos constantemente à mudança de tecnologia no mundo e melhorar os métodos tradicionais (Rhodes, 2017). A tecnologia VANT é potencialmente uma extraordinária ferramenta para efetuar a computação de volumes dada a sua flexibilidade, acessibilidade e facilidade de uso (Raeva et al. 2016).

Do ponto de vista teórico, para calcular o volume de um objeto, projeta-se uma grelha com espaçamento GSD na base da área de interesse (Figura 20). Para cada célula i da malha, o seu volume V_i é dado por (Pix4DMapper, 2017):

$$V_i = L_i \times W_i \times H_i \quad (9)$$

Onde L_i é o comprimento da célula, W_i a largura da célula e H_i a altura da célula.

O comprimento e a largura da célula são iguais ao GSD e a altura é definida por:

$$H_i = Z_{Ti} - Z_{Bi} \quad (10)$$

Onde Z_{Ti} é a altitude do terreno no centro de cada célula e Z_{Bi} a altitude base no centro de cada célula. Deste modo, o volume V_i da célula i é dado por:

$$V_i = GSD \times GSD \times H_i \quad (11)$$

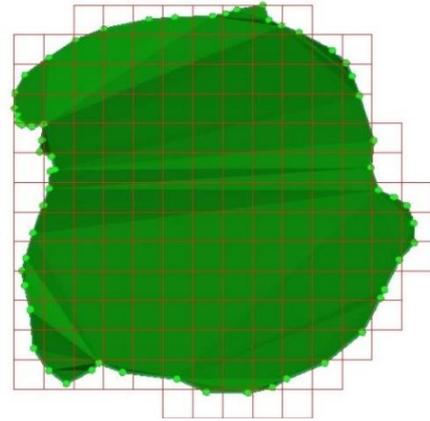


Figura 20: Esquema de uma malha sobre a área de medição (Pix4DMapper, 2017)

No entanto, é fundamental realçar que o Pix4DMapper mede um volume de corte, quando o terreno é mais elevado do que a superfície base, e um volume de enchimento, quando o terreno está abaixo da base. Deste modo, o volume total V_T é dado pela seguinte equação:

$$V_i = V_C + V_F \quad (12)$$

O volume é calculado com base no modelo digital de superfície (MDS) gerado pelo Pix4DMapper pelo que os graus de incerteza nos cálculos de medição de volume dependem da resolução espacial do GSD uma vez que este determina a precisão com que as coordenadas de cada ponto foram determinadas.

Dependendo do tipo de pilha de material que se quer calcular o volume, são utilizados diferentes métodos para a definição da base da superfície. Existem três categorias gerais para as pilhas: pilha com limite inteiro visível, pilha com limite parcialmente visível ou pilha com limites ocultos. No caso dos stocks cujos limites sejam todos visíveis, recomenda-se usar uma triangulação para a superfície base, na qual todos os vértices são conectados, faz-se a divisão da respetiva área em triângulos e calcula-se o volume acima e abaixo da superfície base. Esta opção é recomendada especialmente quando o terreno ao redor do volume é relativamente plano. Pode-se também criar um plano ajustado aos vértices (plano de ajuste) de modo a que todos os vértices estejam à distância mínima da superfície base. Esta opção é recomendada quando a superfície base é uma superfície rígida, um declive ou um plano com a mesma altitude. No caso de stocks cujos limites estejam parcialmente ocultos, pode-se criar uma superfície base segundo o ponto mais baixo de todos os vértices. Esta opção é recomendável em terrenos planos. Para os stocks cujos limites não são visíveis, existe a opção de definir uma altitude personalizada ou importar um modelo digital de terreno (MDT) conhecido. Quando se pretende calcular o volume de enchimento de um vazio, piscina ou lagoa, a superfície base pode ser criada alinhando-a com o ponto mais alto da superfície selecionada (Pix4DMapper, 2017).

3.1.2. Identificação de Rede de Drenagem

A topografia é um dos fatores mais importantes para a formação dos escoamentos superficiais de água e das bacias. Grande parte da análise de padrões e dados hidrológicos tais como redes de drenagem, bacias, fluxos de drenagem, extensão do fluxo de água e declives de taludes podem ser calculadas a partir de modelos digitais do terreno, um dos produtos finais obtidos a partir do processamento das imagens capturadas pelos veículos aéreos não tripulados.

O primeiro passo para identificar a rede de drenagem consiste em determinar a direção de escoamento superficial de água. Existem vários métodos para o calcular, tais como

Deterministic Eight-Node (D8), Random Eight-Node (Rho8), Multiple Flow Direction (MFD), D-Infinity (D-inf) and Digital Elevation Model Networks (DEMONO). O algoritmo D8, adotado neste trabalho, corresponde ao método mais frequentemente utilizado pela sua facilidade algorítmica e estrutura compreensível. O algoritmo D8 é um método no qual o fluxo é determinado numa única direção, do maior para o menor valor de cota altimétrica, entre 8 células vizinhas numa janela 3x3, como exemplificado na Figura 21. Se o valor de uma célula for menor do que os seus oito vizinhos, essa célula receberá o valor do

32	64	128
16		1
8	4	2

Figura 21: Exemplo da janela de pesquisa do algoritmo D8 (baseado em ArcGis, 2021)

seu vizinho mais baixo e o fluxo será definido na direção dessa célula. Por exemplo, se a direção da queda mais acentuada for à esquerda da célula de processamento atual, a sua direção de fluxo seria codificada como 16. Se vários vizinhos tiverem o valor mais baixo, a célula ainda receberá esse valor, mas o fluxo é definido com um dos dois métodos explicados abaixo, sendo realizada uma filtragem de dissipadores da célula, considerados ruído: (ArcGIS, 2021)

- Se uma célula tiver a mesma alteração no valor z em várias direções e essa célula fizer parte de um sumidouro, a direção do fluxo é referida como indefinida. Nesses casos, o valor para aquela célula no *raster* (imagem que contem a informação de cada pixel) de direção do fluxo de saída será a soma dessas direções;
- Se uma célula tiver a mesma mudança no valor z em várias direções e não fizer parte de um sumidouro, a direção do fluxo será atribuída com uma tabela de pesquisa que define a direção mais provável;

Ao determinar a direção de fluxo das células, é possível determinar o volume que escoar para cada célula e calcular o modelo de fluxo cumulativo. O resultado da cumulação de fluxo é um raster de fluxo acumulado para cada célula, conforme representado na Figura 22.

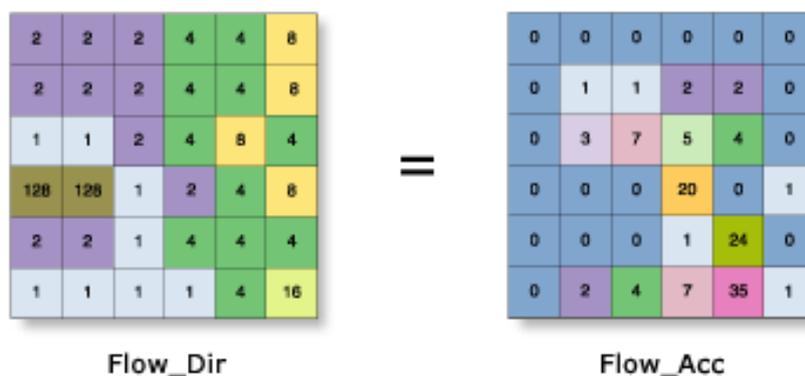


Figura 22: Exemplo do cálculo do fluxo acumulado de cada uma das células a partir do mapa de direção de fluxo (baseado em ArcGis, 2021)

Após a criação do modelo de fluxo cumulativo, é possível extrair-se a rede de drenagem. Para isso definem-se valores limites das células, que irão fazer parte da rede de drenagem (Gunen et al., 2019). A rede de drenagem é caracterizada pelos canais de fluxo que se interligam entre si, a partir de junções que permitem o escoamento entre canais sucessivos, conforme a Figura 23. Para extrair a rede de drenagem é preciso ter como dados de entrada o mapa de direção de fluxo das células e o mapa de fluxo cumulativo.

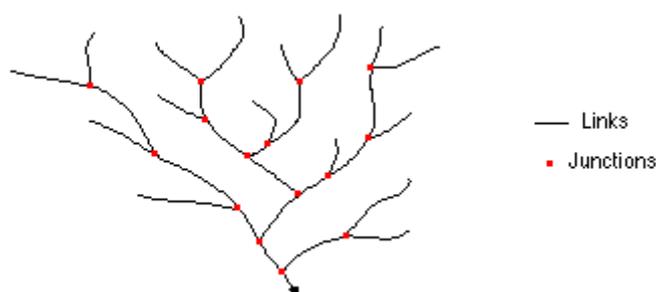


Figura 23: Exemplo de uma rede de drenagem formada pela junção de canais interligados por pontos de saída

3.1.3. Análise do impacto das poeiras

A exploração de minas e pedreiras a céu aberto afeta a cobertura vegetal circundante, assim como as propriedades do solo e a estrutura hidrológica. Deste modo, a restauração, monitorização e inspeção periódica da atividade extrativa e dos seus impactos no ambiente envolvente é fundamental para uma boa gestão dos recursos naturais. No entanto, essa monitorização por vezes é difícil de alcançar através de métodos clássicos, por serem demorados e nalgumas situações perigosas.

Na última década os veículos aéreos não tripulados tornaram-se numa ferramenta popular e acessível para monitorizar, inspecionar e mapear o terreno. As imagens digitais capturadas pelos VANTS podem também ser um método de baixo custo para avaliar o impacto que a indústria extrativa tem sobre a vegetação, a partir do estudo de vários índices de vegetação, neste caso derivados de imagens RGB. No entanto, é de salientar que estes índices de vegetação, uma vez baseados em imagens RGB, têm certas vantagens e limitações em termos de destaque ou omissão de determinadas superfícies. Deste modo, deve-se levar em consideração que a aplicação de índices de vegetação baseados em RGB é

limitada no que diz respeito à monitorização das etapas de crescimento da vegetação, já que o comprimento mais adequado para o fazer é o infra-vermelho próximo (Bendig et al., 2015; Tucker, 1979).

Os índices de vegetação correspondem à combinação ou transformação de bandas espectrais que acentuam as propriedades espectrais da vegetação verde de forma a distingui-las das outras características da imagem (PDX, 2020).

Uma planta saudável tem maior absorção na banda do vermelho e do azul do espectro visível, logo a refletância nessas bandas é baixa. Por outro lado, a vegetação absorve menos a radiação verde, tendo uma maior reflexão nessa banda, conferindo-lhe por isso essa coloração típica. Relativamente à radiação infravermelha-próxima (NIR - near infrared), uma planta saudável tem uma baixa absorção nesse comprimento de onda. Deste modo, o facto da vegetação saudável absorver as bandas vermelha e azul do espectro visível e não absorver a banda infravermelho próximo, permite gerar os índices de vegetação com base na análise das diferentes respostas espectrais. No entanto, tal comprimento de onda não existe na câmara utilizada, explorando-se por somente as bandas do domínio visível do espetro eletromagnético. A tabela 1 apresenta os índices de vegetação testados na presente dissertação.

Tabela 1: Índices de vegetação com base nas bandas vermelho (R), verde (G) e azul (B)

Índice	Fórmula de cálculo	Referência
<i>Modified green-red vegetation index</i> (MGRVI)	$MGRVI = \frac{G^2 - R^2}{G^2 + R^2}$	Bending et al. (2015)
<i>Green leaf index</i> (GLI)	$GLI = \frac{(2 \times G) - R - B}{(2 \times G) + R + B}$	Louhaichi et al. (2001)
<i>Red green-blue vegetation</i> (RGBVI)	$RGBVI = \frac{G^2 - R \times B}{G^2 + R \times B}$	Bending et al. (2015)
<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i> (VARI)	$VARI = \frac{G - R}{R + G + B}$	Gitelson et al. (2002)
<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI)	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	Rouse et al. (1974)

Tratando-se de uma imagem constituída apenas por faixas do visível e de forma a calcular o NDVI, o índice de vegetação mais conhecido, utilizou-se a equação proposta por Arai et al. (2016), de forma a obter uma aproximação da banda do infravermelho próximo (NIR):

$$NIR = \frac{R - 360.6}{-1.1941} \quad (13)$$

3.2. Equipamento

Para a escolha do VANT avaliou-se o custo do equipamento, a facilidade de manipulação, a autonomia de voo e o sistema de posicionamento, sendo que o drone Phantom 4 RTK da DJI (Figura 24) foi o modelo que melhor correspondia aos objetivos pretendidos.

O Phantom 4 RTK é um drone quadricóptero (4 rotores) de levantamento aerofotogramétrico com alta precisão que combina a navegação e posicionamento ao nível centimétrico a um sistema de imagem de elevado desempenho, de forma a reduzir significativamente dificuldades operacionais e custos (DroneShow, 2018).



Figura 24: Veículo aéreo não tripulado da marca Dji e modelo Phantom 4 RTK

O Phantom 4 RTK vem acompanhado de um controlo remoto (comando) com visor integrado com o qual podemos, para além de utilizar os comandos básicos de condução do drone, efetuar também o planeamento da missão e configurar todos os parâmetros relativos ao voo, à captação de imagem e ao sistema de posicionamento. A câmara está acoplada ao drone através de um gimbal que a mantém estável durante todo o voo. O drone vem equipado com os sistemas de GPS e de GNSS para rastrear e executar as suas rotas de voo com precisão, mantendo valores precisos quanto à distância, altitude, velocidade e posicionamento. Relativamente ao sistema de imagem, este possui um sensor CMOS de 1 polegada e 20 Mpxels. O obturador mecânico permite que o Phantom 4 RTK se mova enquanto captura as imagens, sem correr o risco que as mesmas fiquem desfocadas. Devido à alta resolução do sensor é possível obter um valor de GSD de 2,74 cm a 100 metros de altitude de voo. Algumas das principais características do drone são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Especificações técnicas Phantom 4 RTK (baseado em drdnone (2020))

VANT		GNSS	
Peso à decolagem	1391g	Módulo de GNSS de alta sensibilidade de frequência única	GPS+GLONASS+Galileu
Distância diagonal	350mm	Precisão de posicionamento	Vertical: 1.5cm+1ppm Horizontal: (RMS) 1cm+1ppm (RMS)
Alcance máximo acima do nível do mar	6000m	Câmara	
Velocidade máxima de ascensão	6m/s	Sensor	1" CMOS; 20MP
Velocidade máxima de descida	3m/s	Lentes	FOV 84°, 8.8mm/24mm (formato equivalente de 35mm: 24mm); f/2.8-f/11
Tempo máximo de voo	30min	Tamanho máximo de imagem	4864x3648 (4:3) 5472x3648 (3:2)

Para além do Phantom 4 RTK, optou-se também por adquirir a Estação Móvel D-RTK 2 da DJI (Figura 25 que fornece dados diferenciais em tempo real ao drone, criando uma solução precisa de levantamento. A Estação Móvel D-RTK 2 suporta as frequências GNSS GPS, BeiDou, GLONASS e Galileo, oferecendo uma precisão de posicionamento horizontal de 1cm+1ppm (RMS) e vertical de 2cm+1ppm (RMS), sendo que por cada aumento de 1km de distância à estação base, a precisão será 1mm inferior (DJI, 2020).



Figura 25: Antena GNSS da marca Dji e modelo D-RTK 2

3.3. Software

Ao longo do trabalho foram utilizados três softwares distintos para a recolha, processamento e tratamento dos dados. Para definir o polígono KML da área de voo, a importar posteriormente para o controlo remoto do VANT, de forma a definir a rota do plano de voo, recorreu-se ao software Google Earth que permite efetuar essa tarefa de forma rápida, através da definição dos vértices do polígono nas coordenadas da área de interesse. O processamento dos dados foi realizado com recurso ao software Pix4DMapper, que permite criar a nuvem de pontos 3D, modelos digitais de superfície, ortofotos, assim como possibilita a medição de distâncias e cálculo de volumes. Utilizou-se também o software QGIS para extrair a rede de drenagem da água superficial e calcular os índices de vegetação. Os produtos finais também podem ser facilmente importados e trabalhados no software Civil 3D, ferramenta útil para apoio ao planeamento e acompanhamento do desmonte.

Para a realização do processamento dos dados com o software Pix4DMapper, é necessário que o computador possua os requisitos mínimos indicados pelo fabricante, de forma a que o software corra na normalidade, sendo também disponibilizados os requisitos recomendáveis que permitem que o processamento e criação dos produtos finais seja realizada mais rapidamente. As especificações mínimas e recomendadas pelo Pix4DMapper, assim como as características do computador utilizado para o processamento dos dados da presente dissertação, encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3: Requisitos mínimos e recomendados do sistema pelo Pix4DMapper e especificações do computador utilizado

Especificações	Mínimas	Recomendadas	Utilizadas
Sistema operativo	Windows 10, 64 bits	Windows 10, 64 bits	Windows 10, 64 bits
Processador	Qualquer CPU (Intel i5/ i7/ Ryzen 7)	CPU quad-core ou hexa-core Intel i9/ Threadripper / Ryzen 9	AMD Ryzen Threadripper 3970X 32 – Core Processor 3.69 GHz
Gráfica	Qualquer GPU compatível com OpenGL 3.2. (placas gráficas integradas Intel HD 400 ou superior)	GPU GeForce GTX compatível com OpenGL 3.2 e 2 GB de RAM	NVIDIA GeForce GTX 1660 SUPER
Memória	<ul style="list-style-type: none"> <100 imagens a 14 MP: 4 GB de RAM, 10 GB de espaço livre em HDD. 100 - 500 imagens a 14 MP: 8 GB de RAM, 20 GB de espaço livre no disco rígido. 500 - 1000 imagens a 14 MP: 16 GB de RAM, 40 GB de espaço livre no disco rígido. 1000 - 2000 imagens a 14 MP: 32 GB de RAM, 80 	<ul style="list-style-type: none"> < 100 imagens a 14 MP: 8 GB de RAM, 15 GB de espaço livre em SSD. 100 - 500 imagens a 14 MP: 16 GB de RAM, 30 GB de espaço livre em SSD. 500 - 1000 imagens a 14 MP: 32 GB de RAM, 60 GB de espaço livre em SSD. 1000 - 2000 imagens a 14 MP): 64 GB de RAM, 	<ul style="list-style-type: none"> 32 GB RAM e 2 TB de espaço livre SSD

	GB de espaço livre no disco rígido.	120 GB de espaço livre em SSD.	
--	-------------------------------------	--------------------------------	--

3.4. Fluxo de Trabalho

Para a realização da presente dissertação, seguiu-se o fluxo de trabalho descrito na Figura 18, estando este dividido em três fases principais. Primeiramente identificou-se a área de interesse e o objetivo do levantamento, sendo que para cada um dos fins, foram utilizadas configurações de plano de voo distintas. Com as imagens obtidas nos diversos voos, realizou-se o processo de reconstrução fotogramétrica digital utilizando o software Pix4DMapper. Após o processamento das imagens, os produtos resultantes foram utilizados no Sistema de Informação Geográfica (GIS) QGIS e no software CAD Civil 3D.

3.4.1. Fase 1- Preparação do voo

A fase 1 tem como objetivo definir a área a mapear e qual a sua aplicação, de forma a delinear o trajeto para o voo e definir as variáveis que irão produzir os melhores resultados para o objetivo pretendido. Para realizar o plano de voo, começou-se por utilizar a plataforma Google Earth, no qual se definiu o polígono delimitador da área de interesse conforme demonstrado na Figura 26. De seguida, importou-se o polígono para o controlo remoto da DJI, sob a forma de um ficheiro KML a partir do qual se definiu o plano de voo, tendo-se escolhido a forma do trajeto de voo: trajeto linear/grelha simples ou grelha dupla, segundo a Figura 27. O trajeto do voo (Figura 28) é definido e ajustado automaticamente com base na definição dos seguintes parâmetros: altura do voo em relação ao ponto de partida, velocidade de voo, ângulo da câmara, tipo de captura (captura por tempo ou por distância) e percentagem de sobreposição lateral e frontal das imagens adjacentes.

Optou-se por realizar todos os voos com captura das imagens por distância, uma vez que durante o voo, a velocidade do vento influencia também a velocidade do veículo aéreo não tripulado, que não é exatamente a mesma ao longo de toda a missão. Assim, de forma a manter a mesma percentagem de sobreposição em todas as imagens, o VANT em vez de realizar a captura num determinado intervalo de tempo regular, realiza-a numa determinada distância percorrida.

A definição do polígono KML no software Google Earth e a sua importação para o controlo remoto, apesar de não ser um passo obrigatório, é recomendável do ponto de vista operacional, uma vez que o software da DJI permite selecionar o polígono diretamente no comando, no entanto, os mapas apresentados são mais antigos do que os disponibilizados pelo Google Earth, o que dificulta a seleção da área em locais em constante mudança.

Ao longo da dissertação, foram utilizadas diferentes configurações de plano de voo consoante o objetivo pretendido. Para a criação de modelos tridimensionais de áreas mais pequenas, optou-se por escolher um voo em grelha dupla (Figura 27b), com um ângulo da câmara de 60° com a horizontal e sobreposição frontal e lateral das imagens adjacentes superior a 80% e uma altura de voo entre 60 a

70m. Em áreas maiores, de forma a que o tempo de voo não fosse excessivo, optou-se por utilizar uma grelha linear simples (Figura 27a), com uma sobreposição frontal de 70% e lateral de 80%, aumentando-se a altura de voo para valores entre os 100 e 110 m.

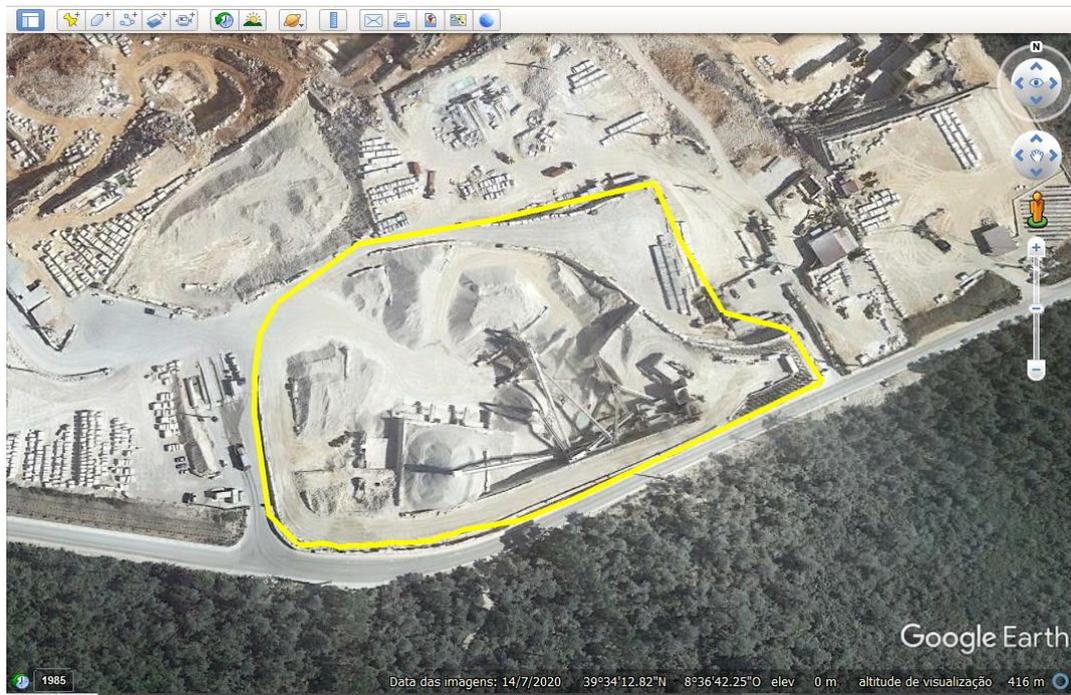


Figura 27: Definição do polígono delimitador da área de voo no software Google Earth

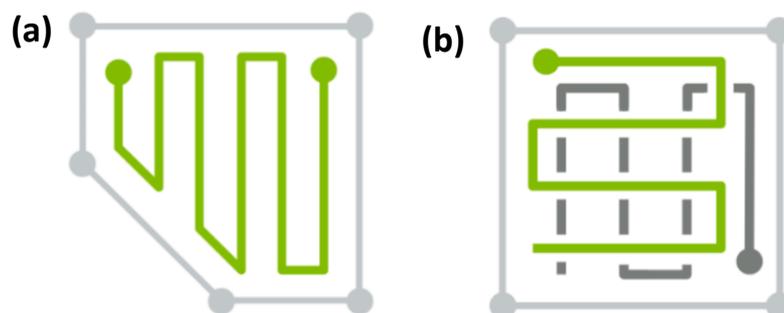


Figura 26: a) Plano de voo linear simples e b) plano de voo em grelha dupla (Pix4DMapper, 2017)

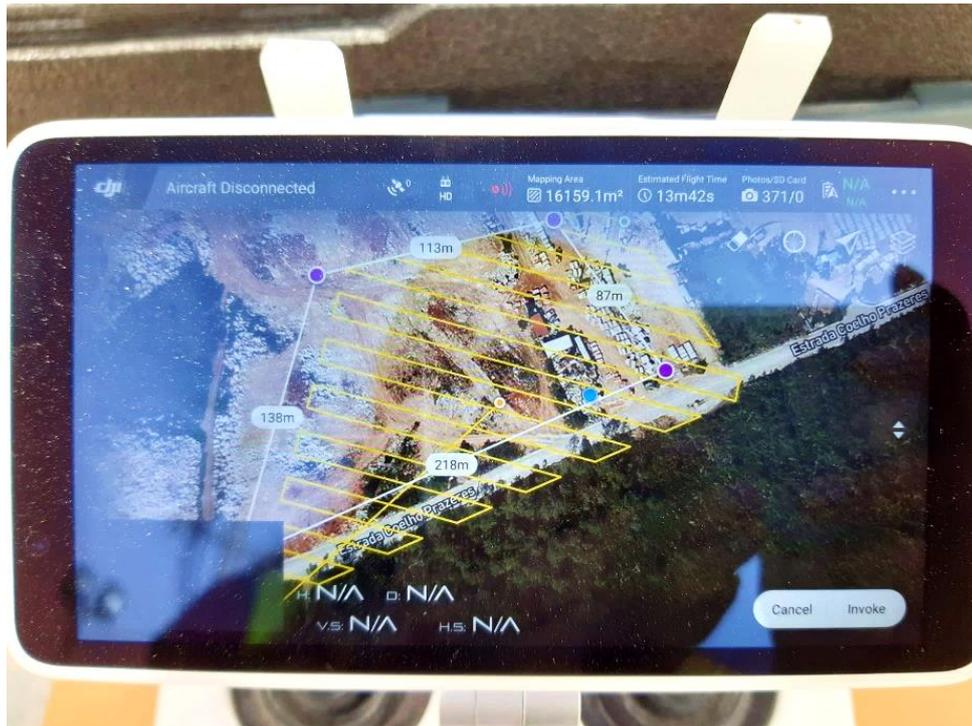


Figura 28: Definição do trajeto de voo, para a área definida pela polígono KML, com base nos parâmetros de voo e imagem definidos no software integrado no controlo remoto da DJI

3.4.2. Fase 2- Realização do voo e recolha de dados

Os pontos de controlo desempenham um papel muito importante no georreferenciamento e avaliação da precisão do modelo MDS. Deste modo, antes de se iniciar o voo, marcou-se no terreno um conjunto de pontos de controlo (GCP) ao longo da área a mapear, com tinta spray de cor e tamanho bem visível. As coordenadas desses pontos foram medidas com a ajuda da Estação Móvel D-RTK 2 (Figura 29) que deve estar conectada pelo menos a uma das Estações GPS/GNSS da Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS (ReNEP), difundida pela Direção-Geral do Território e que define o Referencial Geodésico Nacional.

A ReNEP é um serviço público de geoposicionamento prestado pela Direção-Geral do Território (DGT) que, no âmbito das suas atribuições de manutenção do Referencial Geodésico Nacional, disponibiliza aos utilizadores de equipamentos GPS, dados que facultam a determinação de coordenadas geográficas com precisão melhor que 10 cm. É constituída por Estações GPS/GNSS, de observação contínua, que difundem observações nos Sistemas de Referência ETRS89 (continente) e ITRF93 (regiões autónomas), para posicionamento em tempo-real, utilizando a técnica RTK, ou para pós-processamento com ficheiros RINEX. (Renep, 2021)

Para se realizar a conexão a uma das estações permanentes é necessário realizar previamente um registo de utilizador no site da ReNEP que após aprovação, fornece os dados necessários para efetuar a ligação. Para recolher as coordenadas dos pontos de controlo (ponto central da cruz), conectou-se assim a Estação Móvel D-RTK 2 à estação permanente do Entroncamento (ENTM) com as seguintes características:

- Latitude: 39°28'16.26475"N (M -29325.561m)
- Longitude: 8°28'26.07225"W (P -21824.934m)
- Altitude elipsoidal: 98.964m
- Altitude ortométrica: 44.654m
- Sistema de referência: ETRS89



Figura 29: Medição dos pontos de controlo no terreno (a) com recurso à antena móvel (b)

O veículo aéreo não tripulado, para além da câmara, tem integrado um sistema de navegação GNSS (Global Navigation Satellite System) e um sistema inercial IMU (Inertial Measuring Unit). O GNSS fornece a posição absoluta do sensor e o IMU fornece as acelerações lineares e angulares em cada momento de voo, que é reiniciado a cada medição com o GNSS. Quando o sinal falha, é possível assim obter as posições absolutas e altitude através das medições do IMU. A existência destes sistemas, juntamente com a presença do piloto automático, permitem ao VANT cumprir a missão autonomamente, sendo apenas necessário que o piloto do VANT (Figura 30) o mantenha sempre em linha de vista de forma a poder agir de imediato no caso de algum imprevisto, avaliar as condições meteorológicas e realizar a troca de baterias.



Figura 30: Início da execução da missão (disponibilizado por Filstone- Comércio de Rochas, S.A.)

3.4.3. Fase 3- Processamento dos Dados

Para importar os pontos de controlo recolhidos no terreno para o software de processamento Pix4DMapper, de forma a aumentar a exatidão geométrica e posicional do modelo, é necessário realizar a transformação das coordenadas desses pontos para o sistema de referência pretendido para o projeto: PT-TM06/ETRS89.

Como referido anteriormente, as Estações Permanentes da ReNEP fornecem informação no sistema de referência ETRS89, enquanto a antena móvel D-RTK 2 da DJI disponibiliza os dados no sistema de referência WGS84.

O datum World Geodetic System de 1984 (WGS84) constitui o datum que melhor se ajusta a todo o globo terrestre. Corresponde a um datum geocêntrico que utiliza o elipsoide de referência com o mesmo nome (WGS84). Este datum geralmente utiliza-se sob a forma de um sistema em coordenadas geográficas correspondente a distâncias angulares em que a origem do referencial é o meridiano de Greenwich e o paralelo Equador, respetivamente para a longitude e para a latitude. O centro do Elipsóide WGS84 coincide com o centro de massa da Terra e o eixo X com o eixo de rotação da Terra. Este sistema é utilizado pelo sistema de navegação global por satélite GNSS e constitui um dos sistemas de referência espacial mais utilizados. Quando utilizado na sua componente projetada, o WGS está usualmente associado à projeção universal transversa de Mercator (UTM), com um sistema de coordenadas cartesiano muito semelhante ao ED50-UTM, com o fuso 29N (para Portugal continental) e origem deslocada em 500 km para oeste do meridiano de referência sobre o equador (APRH, 2007).

O datum ETRS89 é fixado na parte estável da placa Euro-Asiática e utiliza o elipsoide de referência designado por GRS80 (Geodetic Reference System 1980). O GRS80 é um elipsoide

muito semelhante ao elipsoide WGS84, com uma consistência entre ambos na ordem do metro, o que torna muitas vezes as diferenças posicionais entre estes *data* negligenciáveis e considerados virtualmente idênticos, eliminando a necessidade de aplicar transformações de coordenadas (Silva, 2016). A utilização do datum ETRS89 utilizando a projeção do tipo Transversa de Mercator constitui o sistema designado por ETRS89-TM06, com referencial cartesiano cuja origem se localiza no centro geométrico de Portugal. Os atributos dos sistemas de referência WGS84 e PT-TM06 encontram-se na Figura 31.

Deste modo, podendo-se considerar do ponto de vista prático, o datum ETRS89 idêntico ao WGS84, não é necessário efetuar nenhuma transformação de datum, pelo que os valores de longitude e latitude são considerados equivalentes, sendo necessário aplicar apenas uma projeção cartográfica. Isto permite à antena móvel D-RTK 2 receber os dados de posicionamento em tempo real das Estações GPS/GNSS.

WGS 84 (EPSG 4326)	PT-TM06 (EPSG 3763)
Elipsoide: WGS84 (EPSG 7030)	Sistema: ETRS89
Sistema Geodésico Mundial 1984 (EPSG 6326)	Elipsoide de referência: GRS80 (EPSG 7019)
Meridiano: Greenwich (EPSG 8901)	Semi-eixo maior: a = 6 378 137 m
Unidade: grau (EPSG 9122)	Achatamento: f = 1 / 298,257 222 101
	Transformação: 0
	Meridiano: Greenwich (EPSG 8901)
	Unidade: grau (EPSG 9122)
	ETRS84 (EPSG 4258)
	Projeção cartográfica: Transversa de Mercator
	Latitude de origem: 39° 40' 05",73 N
	Longitude de origem: 08° 07' 59",19 W
	Coefficiente de redução de escala no meridiano central (Fator de escala):1
	Falsa origem das coordenadas retangulares (Falso Este e Falso Norte): M= 0m P= 0m
	Eixos: X – Este Y- Norte

Figura 31: Atributos dos sistemas de referência WGS 84 e PT-TM06

Para transformar as coordenadas dos pontos de controlo do sistema de referência WGS84 (EPSG 4326) para PT-TM06 (EPSG 3763) utilizou-se a ferramenta disponibilizada em: <https://mygeodata.cloud/cs2cs/>.

A altitude obtida pelas observações GNSS corresponde à altura elipsoidal, isto é, a altura em relação ao geóide (superfície equipotencial do campo gravítico da Terra que melhor se ajusta ao nível médio das águas do mar), pelo que de forma a representar os dados num mapa, é

necessário determinar a altura ortométrica que descreve a altura dos pontos na superfície da Terra a partir da expressão:

$$H = h - N \quad (14)$$

Onde H é a altura ortométrica, h é a altura elipsoidal fornecida pelo recetor GPS e N é a ondulação do geóide (diferença vertical local entre o elipsoide de referência e o geóide naquela área). A Figura 32 demonstra a relação entre a altura elipsoidal, a altura ortométrica e a altura do geóide.

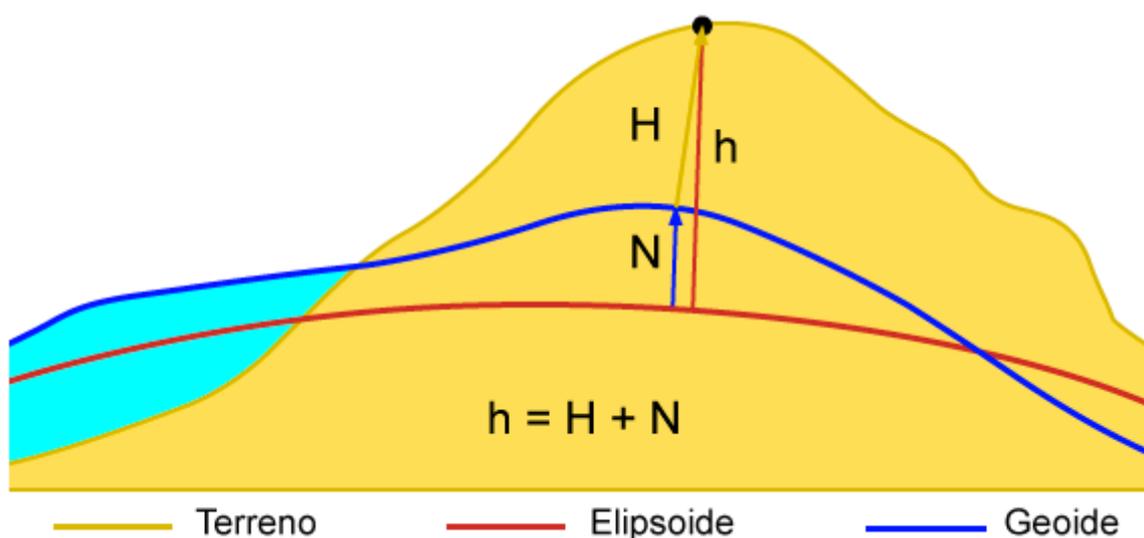


Figura 32: Altura elipsoidal, altura ortométrica e ondulação do geóide

O modelo do geóide EGM2008 é atualmente o modelo gravitacional oficial da Terra a nível mundial, utilizado conjuntamente com o sistema de referência WGS84. No entanto, de forma a aumentar a precisão do posicionamento vertical, a FCUL em parceria com a Divisão de Geodesia elaborou o modelo do geóide GeodPT08, ajustado para Portugal Continental, construído com base no modelo do geóide gravimétrico ICAGM07 (*Iberia-Canarias-Azores Geoid Model 2007* – modelo do geóide para o Atlântico Norte, Ibéria e ilhas Macaronésicas) por ajuste às redes geodésicas do Continente, tendo-se utilizado 137 marcas de nivelamento e 1020 vértices geodésicos, fornecendo uma precisão global estimada de 4cm. A DGT disponibiliza o modelo do geóide GeodPT08 expresso em metros, referente ao elipsoide GRS80, utilizado no sistema de referência PT-TM06/ETRS89, que permite o posicionamento em tempo real, sem requisitos de calibração local, para um grande número de aplicações topográficas. Desta forma, as altitudes elipsoidais obtidas com a antena D-RTK 2 foram transformadas em altitudes ortométricas pela aplicação das grelhas NTV2, disponibilizadas pela DGT em <http://cgpr.dgterritorio.pt/webtranscoord/>.

Para realizar o processamento dos dados e obter os respectivos produtos fotogramétricos, recorreu-se ao software Pix4DMapper. O Pix4DMapper é um software de fotogrametria para mapeamento com VANTs que através dos algoritmos anteriormente descritos (na seção 3.1 Metodologia) transforma as imagens 2D em ortofotomapas digitais e modelos de relevo 3D. Os principais produtos gerados são a nuvem de pontos, modelo 3D texturizado, ortomosaico, modelo digital de superfície (MDS) e mapa de refletância.

De forma a dar início à etapa de processamento dos dados, cria-se um projeto novo no Pix4DMapper, no qual são importadas as imagens capturadas pelo veículo aéreo não tripulado, assim como as respectivas coordenadas centrais de cada uma das fotos e orientações da câmara. De seguida define-se as coordenadas de saída do projeto (neste caso, o sistema de referência ETRS89/PT-TM06) assim como o sistema vertical (escolheu-se o modelo do geóide EGM2008, que posteriormente será corrigido para o geóide GeodPT08 com base nas coordenadas inseridas dos GCPs). O processo de criação do modelo de relevo e ortofoto compreende as etapas ilustradas na Figura 33.

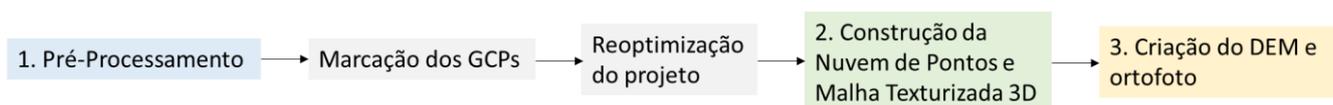


Figura 33: Etapas de processamento dos dados

Durante a primeira etapa (Pré-Processamento ou Fase de Alinhamento), o software recorre à técnica SfM para identificar os pontos homólogos nas imagens onde existe sobreposição, permitindo encontrar ou otimizar a posição e orientação das câmaras e os parâmetros de orientação interna, resultando desta etapa uma nuvem de pontos esparsa, as posições e orientações das câmaras e os parâmetros de orientação interna (Rodrigues, 2016).

Depois do pré-processamento, é importante inserir as coordenadas dos GCPs no software. O mesmo GCP deve ser identificado e marcado manualmente pelo operador no maior número de fotografias possível. De forma a facilitar esta tarefa, após identificarmos os pontos em algumas fotografias, o software 'vai aprendendo' e estima automaticamente a sua posição nas restantes imagens. De seguida, os parâmetros de orientação interna e externa da câmara são recalculados, através da reoptimização do alinhamento das imagens.

Após a reoptimização dos dados do projeto, dá-se início à construção da nuvem densa de pontos (e malha texturizada 3D caso seja pretendido pelo utilizador) que permite criar o modelo digital da superfície (MDS) que por sua vez permite criar o ortofoto. É ainda possível gerar o modelo digital do terreno (MDT) com informação apenas da elevação do solo, ou seja, sem as estruturas naturais (árvores, plantas ou similares) ou construídas (sendo, no entanto, necessário efetuar uma classificação da nuvem de pontos), assim como a geração de curvas de nível com informação das elevações dos respetivos modelos. Para obtenção destes produtos fotogramétricos utilizou-se a metodologia explicada no capítulo 3.1.

4. Resultados e Discussão

De seguida são apresentados os resultados obtidos pela implementação da metodologia descrita no capítulo anterior. Primeiramente começou-se por fazer o mapeamento da pedreira com o intuito de obter um modelo que servisse de ferramenta de apoio ao planeamento do desmonte. De seguida efetuou-se um levantamento topográfico na zona da unidade de britagem de forma a encontrar um método rápido e fiável para medir os stocks de agregados. Analisou-se ainda a importância da utilização de pontos de controlo nos levantamentos topográficos assim como a fiabilidade da medição de volumes a partir dos mesmos. Por fim, fez-se um estudo do potencial do uso de dados de VANT como apoio à gestão ambiental, no qual se avaliou a rede de drenagem na zona das oficinas e rampas de acesso à pedreira e se estudou o impacto da deposição das poeiras na vegetação envolvente.

4.1. Mapeamento da Pedreira

Para fazer o mapeamento da pedreira realizou-se um voo que cobriu uma área de 105 064.2 m², a uma altura de 80 m relativamente ao ponto de descolagem, uma velocidade de voo de 6.3 m/s e uma sobreposição frontal e lateral de 80%. O voo teve uma duração de aproximadamente 55 minutos e capturou-se um total de 1 418 imagens. Os produtos fotogramétricos obtidos em cada uma das etapas de processamento dos dados recolhidos no levantamento da área da pedreira são apresentados de seguida.

Após o software analisar todas as fotografias e identificar pontos comuns entre as mesmas (tendo sido identificados em média 50 066 pontos comuns por imagem e estando 6 deles representados com cruces verdes na Figura 34), são definidos os pontos de ligação aos quais são atribuídos, após aplicação do algoritmo SfM, coordenadas 3D correspondentes ao terreno. O algoritmo SfM modela a localização, altitude e ângulo das câmaras, de forma a alinhar as imagens e reconstruir uma nuvem esparsa de pontos 3D, como podemos observar na Figura 35, constituída por 7 583 663 pontos 3D. Podemos também verificar que os dados recolhidos e os parâmetros de processamento seleccionados permitiram obter um correto alinhamento das fotografias, assim como proceder à criação da nuvem esparsa de pontos com sucesso (Figura 35 e 36).

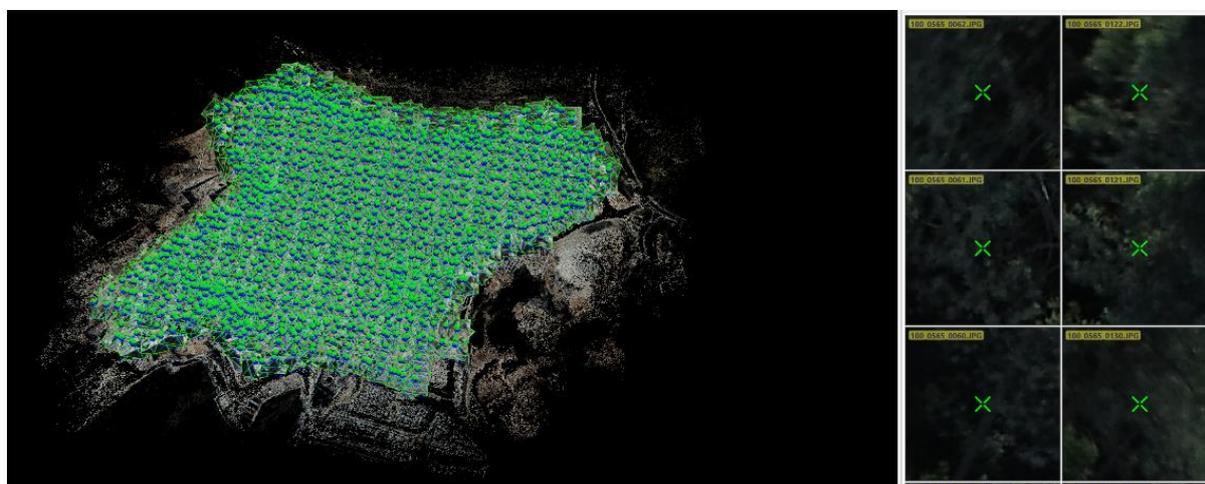


Figura 34: Alinhamento das imagens e identificação de pontos comuns nas mesmas

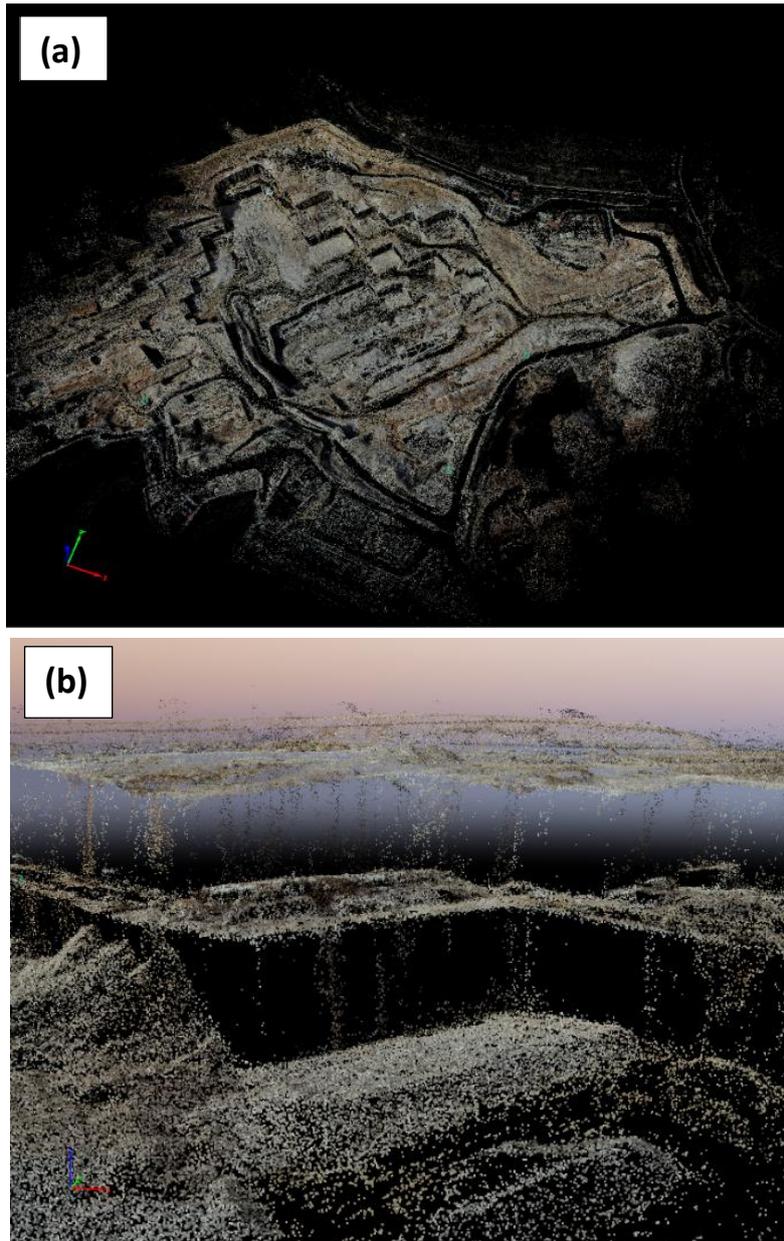


Figura 35: Nuvem esparsa de pontos (*Pontos de Empate*) resultantes do mapeamento da pedra: a) imagem geral e b) pormenor de uma bancada

De forma a corrigir as coordenadas da nuvem de pontos criada na fase de pré-processamento e aumentar a exatidão do modelo, foram adicionados 4 pontos de controlo marcados no terreno antes da realização do voo com o VANT e cujas coordenadas foram medidas com a antena D-RTK 2. Para isso, seleccionou-se o ponto central de cada uma das marcas pintadas no terreno e visíveis na imagem e adicionou-se as coordenadas medidas (Figura 36). De seguida, procedeu-se à reoptimização dos dados gerados, de forma a corrigir/ajustar a georreferenciação do modelo. O tempo médio de execução desta etapa é de cerca de 1 hora, sendo que a duração do mesmo é influenciada pelo número e tamanho das fotografias, a existência ou não de informação relativa à localização de captura, assim como os parâmetros de correção e calibração a considerar para o alinhamento das fotografias.

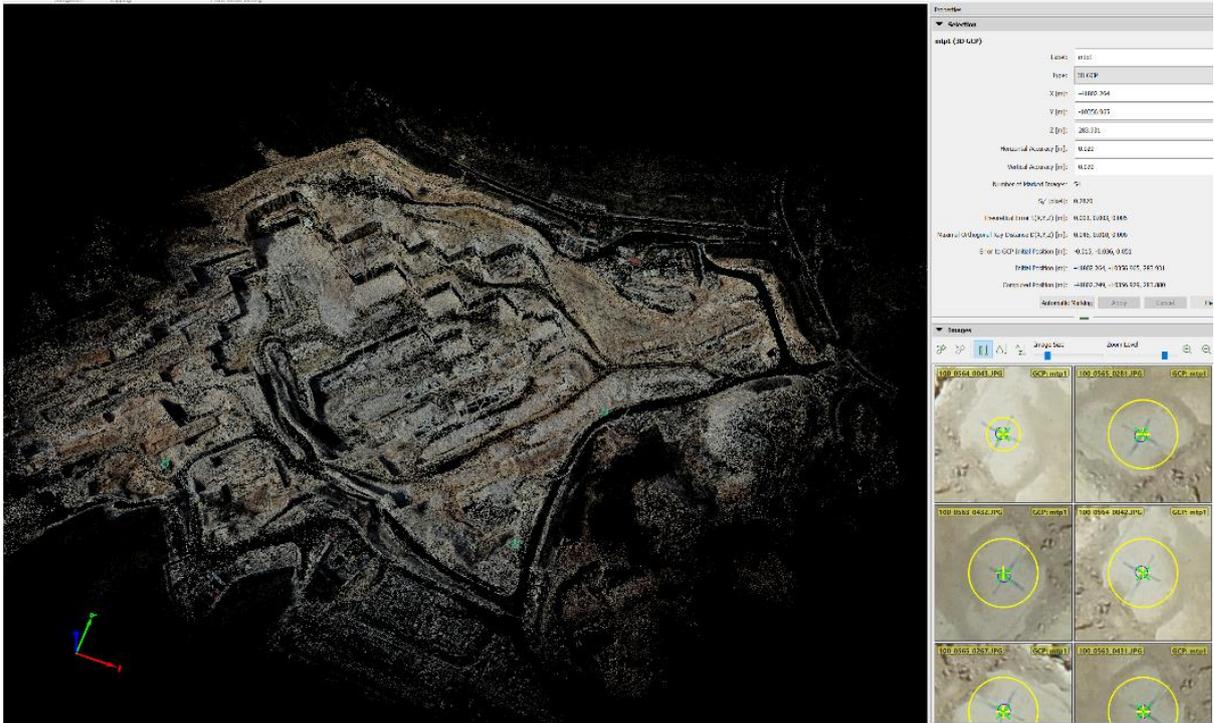


Figura 36: Marcação dos pontos de controlo na nuvem esparsa de pontos

Com a nuvem esparsa de pontos corretamente georreferenciada e corrigida, é possível aumentar a densificação dos pontos da mesma, através da aplicação do algoritmo *Multi View Stereo* (MVS), que usa as orientações e localização das câmaras modeladas para realizar uma busca exaustiva e encontrar melhores correspondências de pixels em todas as grelhas de pixels sobrepostas nos pontos de ligação. Desta forma, resulta a nuvem densa de pontos com um total de 353 910 040 pontos, ou seja, com 46,7 vezes mais pontos que a nuvem anterior (Figura 37). Este processo, embora automático, é bastante complexo e exigente do ponto de vista computacional, correspondendo à fase mais demorada de todo o processamento. O tempo médio desta tarefa é de cerca de 5/6 horas, sendo que a duração depende do tamanho da memória RAM do computador, do número de fotografias e do pormenor com que será construída a nuvem de pontos densa. A construção da nuvem de pontos densa foi realizada com sucesso, tendo-se obtido uma nuvem com uma elevada densidade de pontos que permite uma visualização mais completa do modelo tridimensional da pedra, a cores reais, assim como já permite a medição precisa das coordenadas de cada um dos pontos e o cálculo de distâncias.



Figura 37: Nuvem de pontos densa: a) imagem geral e b) pormenor de uma bancada

De forma a obter um modelo 3D mais homogéneo e melhorar o aspeto visual, preenchendo os espaços vazios existentes na nuvem de pontos, o software permite também criar uma malha texturizada 3D, conforme podemos observar na Figura 38.

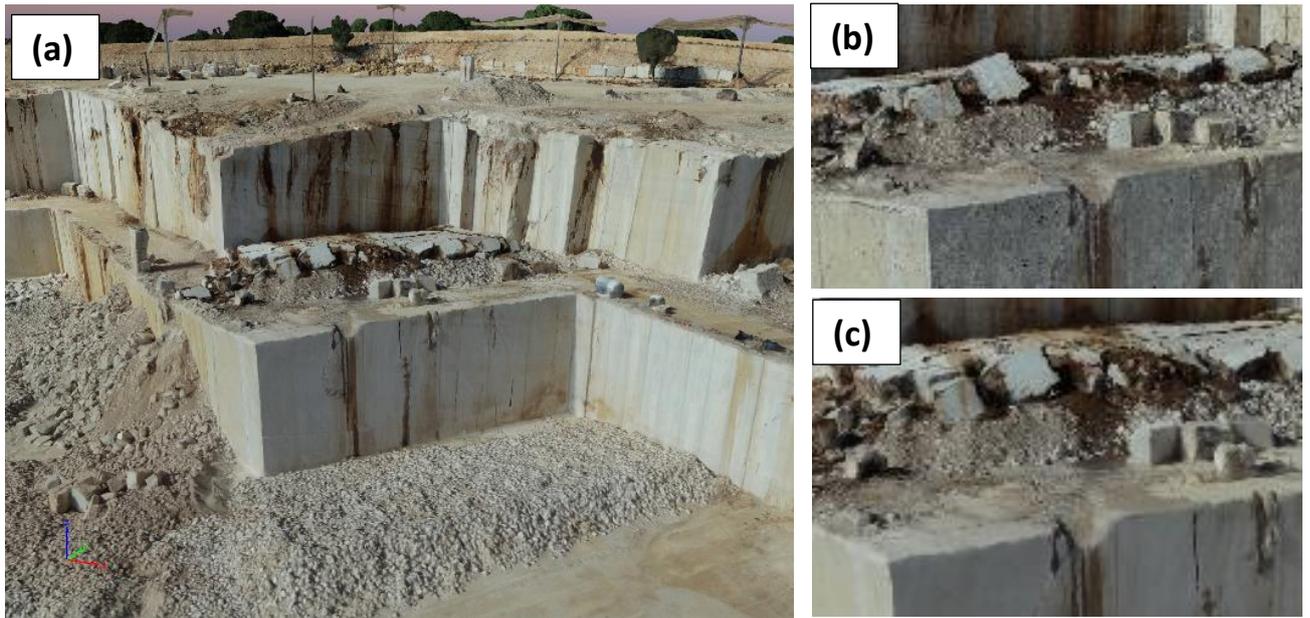


Figura 38: Malha texturizada 3D: pormenor de uma bancada (a) e comparação do resultado de uma nuvem de pontos (b) com a malha texturizada resultante (c)

Uma vez gerada a nuvem densa de pontos, segue-se a aplicação de técnicas de interpolação e triangulação de forma a produzir o modelo digital de superfície (Figura 39), com as elevações de todas as estruturas presentes na área mapeadas, o Modelo Digital de Terreno (Figura 40) obtido através da classificação e filtragem da nuvem de pontos, no qual apenas a superfície terrestre é representada, e o ortofoto (Figura 41), uma imagem raster com a visualização 2D.

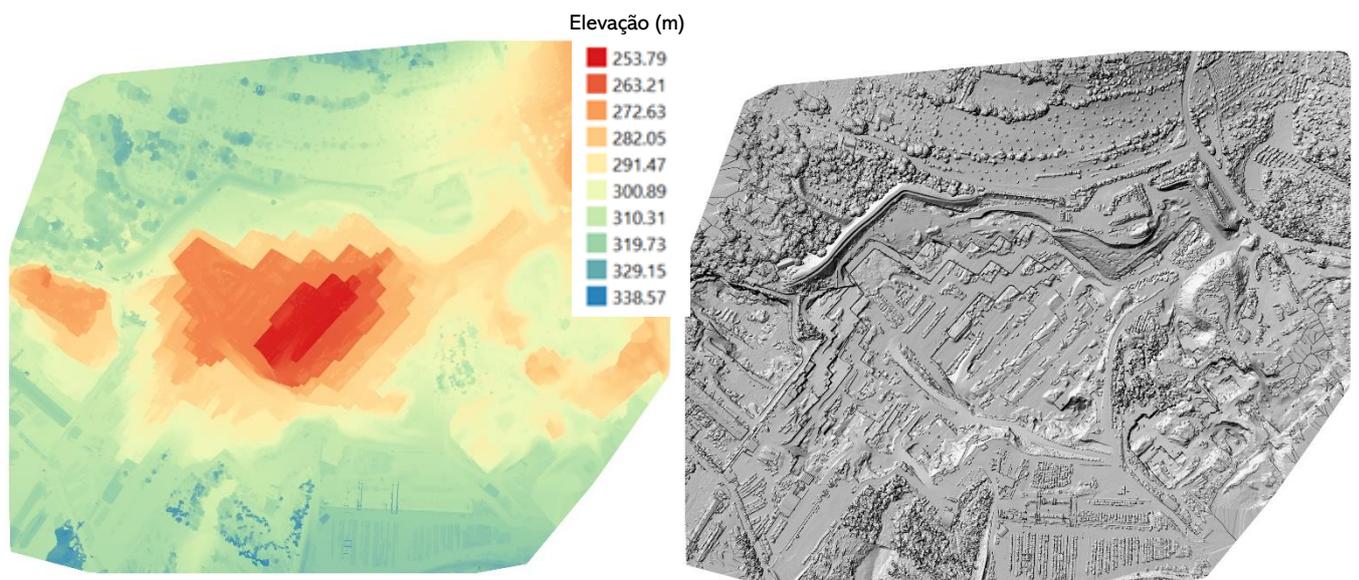


Figura 39: Modelo Digital de Superfície (MDS) da área da pedra, com escala de elevações em metros (à esquerda) e representado em modo sombreado (à direita)

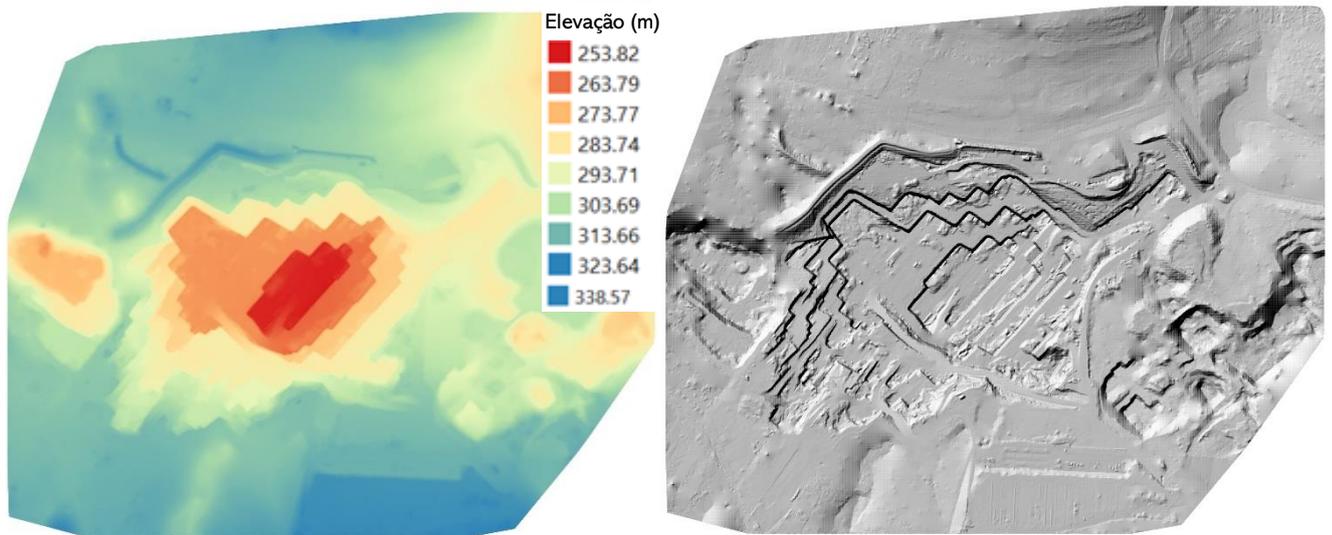


Figura 40: Modelo Digital de Terreno (MDT) da área da pedreira, com escala de elevações (à esquerda) e representado em modo sombreado (à direita)



Figura 41: Ortofoto da área da pedreira

4.1.1. Análise da utilização de Pontos de Controle

Segundo o software fotogramétrico Pix4DMapper, devem ser incluídos 5 a 10 pontos de controle por projeto, sendo que a colocação de mais pontos de controle nem sempre representa uma melhoria significativa nos produtos gerados.

Na tabela 4, encontram-se os erros médios RSME (root mean square error) obtidos no georreferenciamento dos produtos finais de 5 voos, após a introdução dos pontos de controle, assim como a translação efetuada a partir dos dados originais (Figura 42). O menor valor RMSE

no georreferenciamento verificou-se com o voo em que se utilizou um maior número de GCPs por área de voo (GCPs/km²=16.8) no entanto, pela observação do gráfico da Figura 43 podemos verificar que um maior número de GCPs por área, não corresponde efetivamente a uma diminuição do erro no georreferenciamento do modelo. Os dados obtidos, revelaram-se pouco conclusivos relativamente à quantidade exata de número de GCPs que permitem obter o menor RMSE [m] do modelos topográficos gerados, sendo necessária uma análise mais detalhada com um maior número de testes, colectando um maior número de pontos de controlo para uma determinada área, e efetuando o processamento dos dados da mesma, alternando o número de pontos utilizados em cada processamento. A partir da tabela 4 podemos também observar que, no geral, os produtos finais gerados sofrem uma translação das coordenadas para Noroeste após a introdução dos pontos de controlo no projeto, com um deslocamento médio de 0.411m para Oeste e 0.757m para Norte, e uma diminuição na altitude com um valor médio de 0.373m. Conclui-se que apesar de não se ter obtido um número exato que garanta o menor erro dos produtos finais, a utilização de pontos de controlo no terreno mostrou-se necessária para corrigir o posicionamento dos modelos gerados.

Tabela 4: Erro RMSE médio no georreferenciamento dos produtos gerados e respetiva translação das coordenadas

Área [km ²]	GCPs	GCPs/km ²	RMSE [m]	Translação		
				X [m]	Y [m]	Z [m]
0,508	5	9,8	0,029	0,064	-1,131	-0,283
0,696	7	10,1	0,059	1,005	1,062	0,569
1,001	12	12,0	0,032	-0,476	0,424	-0,315
0,457	7	15,3	0,035	-0,016	0,367	-0,448
0,297	5	16,8	0,019	-0,496	0,804	-0,252
			0,035	0,411	0,757	0,373

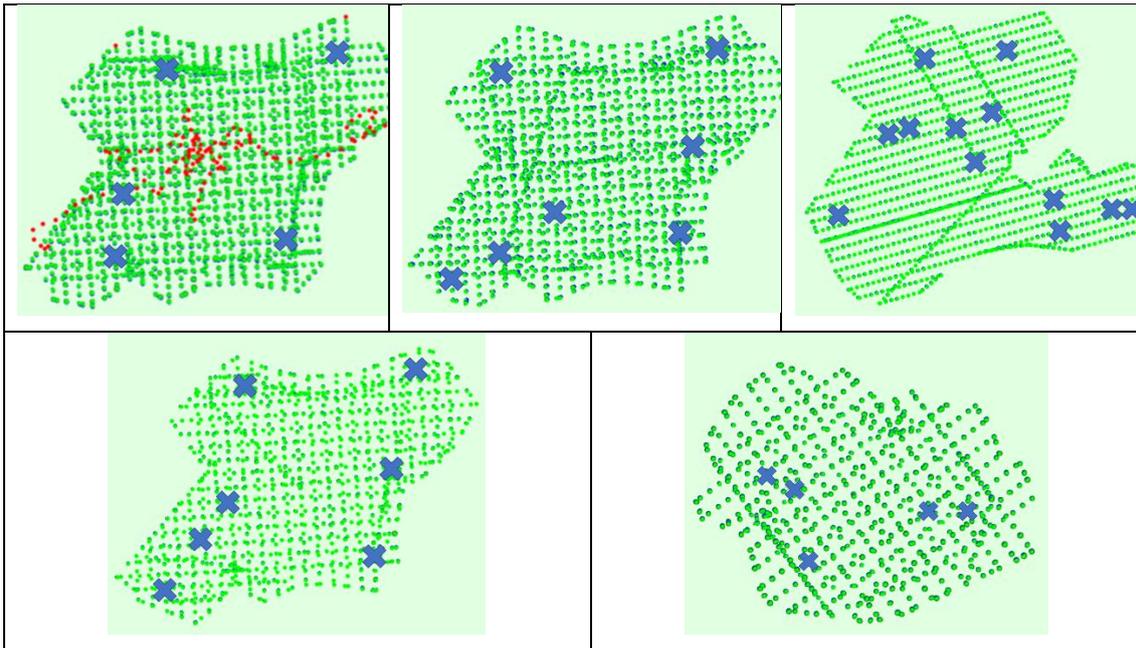


Figura 42: Distribuição dos pontos de controle (cruzes azuis) sobre as 5 áreas mapeadas. Os pontos que se encontram nas imagens representam o deslocamento entre as posições iniciais (pontos azuis) e as posições calculadas (pontos verdes) das imagens capturadas pelo VANT. Os pontos vermelhos indicam as imagens desativadas ou não calibradas.

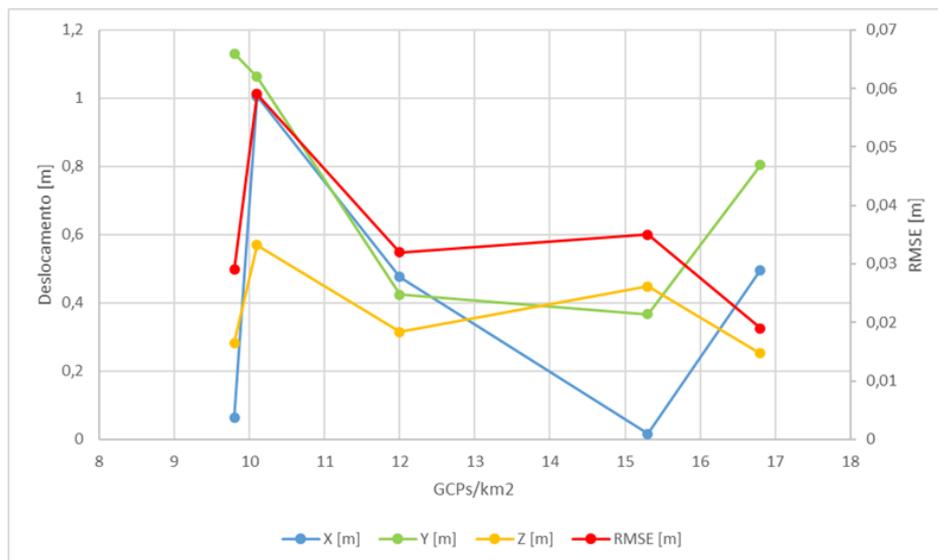


Figura 43: Deslocamento absoluto nas coordenadas dos produtos gerados

4.1.2. Ferramenta de apoio à produção

Com um modelo preciso da área de exploração da pedra e das infraestruturas de apoio, produzido a partir das imagens dos veículos aéreos não tripulados, torna-se possível projetar e gerir as operações com maior eficiência, o que permite avaliar com maior precisão o volume de material que deve ser extraído, efetuar o cálculo com maior rapidez e com maior precisão dos stocks ou reservas, otimizar as estradas de acesso, supervisionar taludes instáveis e até

monitorizar o meio ambiente envolvente (Haas et al., 2016; Francioni et al., 2015; Salvini et al., 2018; Hu et al., 2019).

A nuvem densa de pontos possui informação geoespacial e de cor de cada um dos pontos representativos do modelo da pedra. Deste modo, é possível efetuar medições de distâncias e de volumes (após geração do MDS), não só das bancadas de exploração, como das descontinuidades presentes no maciço rochoso.

Um dos dados de extrema importância para um bom planeamento da exploração de uma pedra de rocha ornamental, é a informação das respetivas frentes de trabalho. A partir da nuvem de pontos, tal como demonstrado na Figura 44, é possível efetuar a medição do comprimento e da altura de cada uma das bancadas, permitindo efetuar o cálculo do volume de cada uma das talhadas a desmontar. É ainda possível identificar e estimar o volume de cada uma das fisgas (terra rossa) e vazios (algares/cavidades cársicas) presentes na bancada, de modo a obter o volume que corresponde apenas a rocha e calcular a massa volúmica real da talhada a desmontar. A partir do modelo tridimensional da pedra, é também possível analisar o sistema de fracturação do maciço rochoso, de forma a determinar a geometria e o volume dos blocos *in situ*, fornecendo uma previsão preliminar da qualidade dos blocos e da taxa de aproveitamento da talhada (Aguiar et al., 2003). Este tipo de cálculo é possível graças à rapidez dos levantamentos topográficos efetuados com recurso aos VANTs, que permitem a atualização de cada uma das frentes à medida que o desmonte das respetivas talhadas é efetuado.

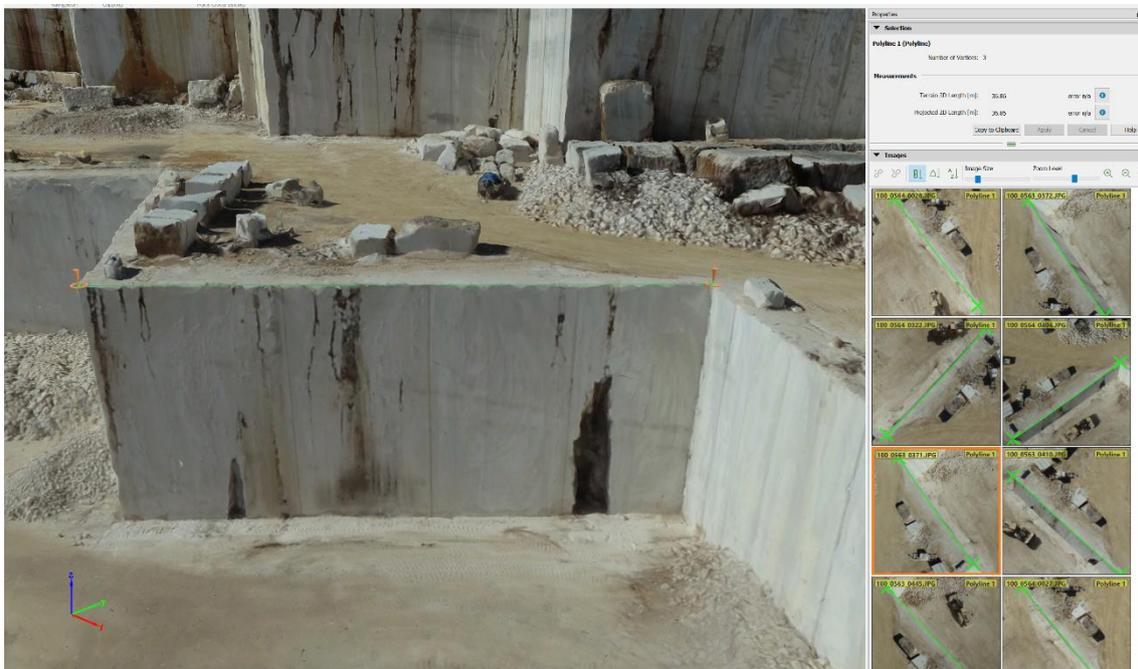


Figura 44: Medição do comprimento da bancada na nuvem de pontos densa com o software Pix4DMapper

Para além da nuvem densa de pontos, a criação de ortofotos georreferenciados é também uma forte ferramenta de apoio, não só no planeamento do desmonte como também no seu

acompanhamento e registo temporal, a partir da criação de mapas de levantamento topográfico detalhados.

A Figura 45 é um exemplo que ilustra bem estes aspetos, correspondendo a um levantamento topográfico efetuado no mês de outubro de 2020, criado com o software Civil 3D e no qual está desenhado o planeamento do desmonte para esse mês, o registo das talhadas derrubadas, os limites das bancadas, as rampas de acesso, os taludes de recuperação paisagística e todas as infraestruturas de apoio à pedreira, desde oficinas, depósitos de gasóleo, depósitos de água, escritórios, postes de iluminação, etc... Os mapas de levantamento topográfico possuem também informação relativa à escala do desenho, sistema de referência/coordenadas utilizado, orientação e localização geográfica, curvas de nível (curvas altimétricas) e pontos cotados.

A Figura 46 é uma ampliação da Figura 45, no qual podemos observar as talhadas planeadas (secções a laranja) para cada frente de trabalho, as talhadas já derrubadas desse planeamento (secções a lilás) e respetivo número de talhada (à medida que as talhadas são derrubadas, é-lhes atribuído por ordem de queda, um número de referência de forma a guardar numa base de dados toda a informação relativa a essa talhada, desde volumes, a números de cortes de esquartejamento e esquadriamento, números de blocos e produções de cada tipo de massa), assim como a direção de avanço de cada frente (linhas a amarelo e vermelho), que deve ser sempre perpendicular à família de descontinuidades de forma a garantir o melhor aproveitamento do material desmontado.

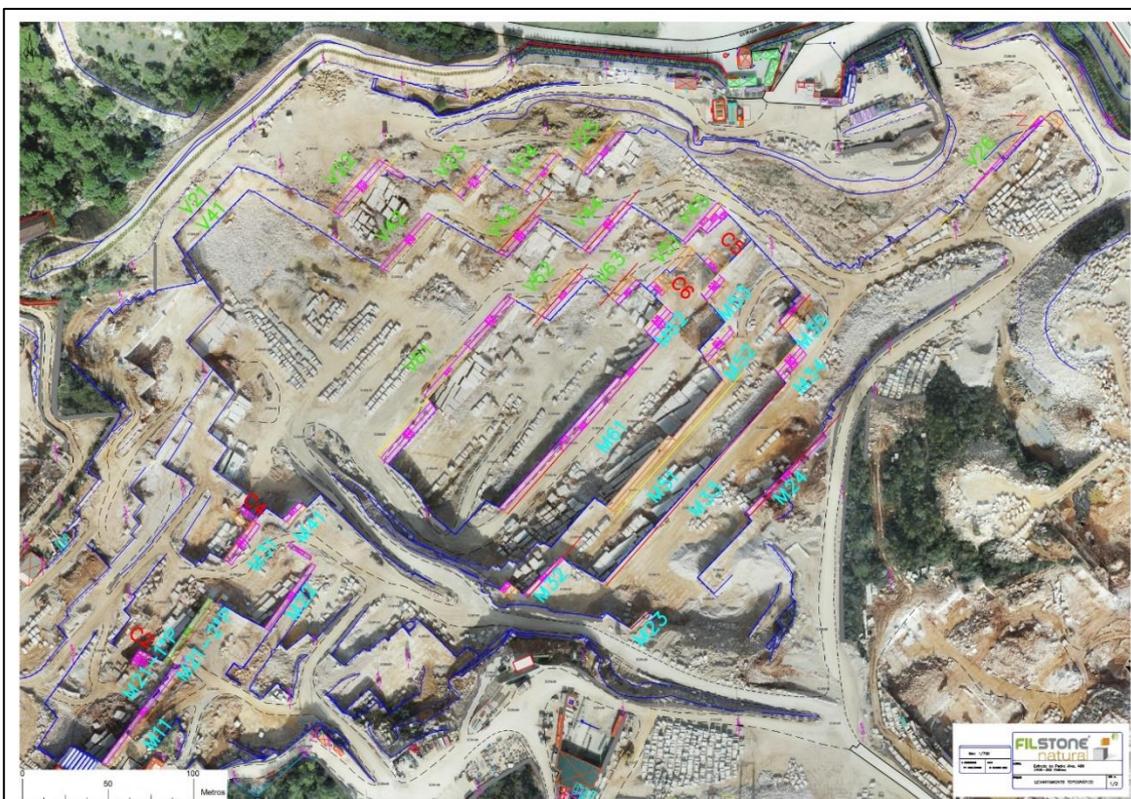


Figura 45: Levantamento topográfico à escala 1/500 da área da pedreira explorada pela empresa Filstone- Comércio de Rochas, S.A. relativo ao final do mês de outubro de 2020



Figura 46: Aproximação da Figura 45 com pormenor do planeamento das frentes de trabalho. Na cor laranja estão representadas as talhadas planeadas para o desmonte do mês de outubro de 2020, a cor-de-rosa as talhadas já derrubadas, com o respetivo número de referência da talhada, e a verde o nome de cada uma das frentes de desmonte.

O mapeamento da pedra com recurso a veículos aéreos não tripulados permite também estimar a taxa de recuperação da talhada, ou seja, calcular o volume de material vendável que se obtém através do esquartejamento das subtalhadas existentes no volume aproveitado. Para isso, efetuou-se um voo sobre uma talhada derrubada, tendo-se capturado apenas 5 fotos nadir (na vertical) em voo manual, conforme as Figuras 47 e 48.

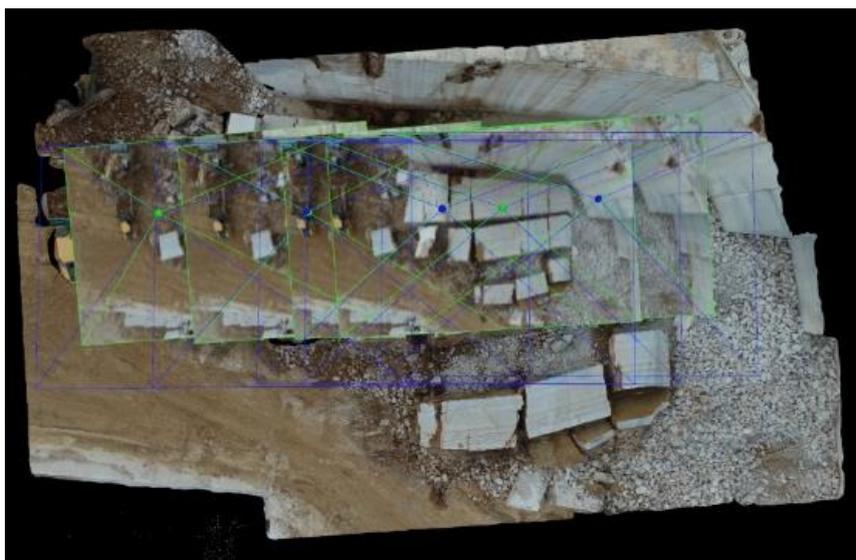


Figura 47: Imagens capturadas para medição do volume da talhada desmontada



Figura 48: Ortofoto da talhada desmontada

Contrariamente ao esperado no início do desenvolvimento da presente dissertação, não foi possível distinguir através das imagens os tipos de massa de cada uma das camadas estratigráficas existentes na talhada, uma vez que, sendo as massas distinguidas pela dimensão e dispersão dos grãos na matriz rochosa, seria necessário que o drone efetuasse a captura das imagens muito próximo da superfície, de forma a aumentar a sua resolução espacial e assim ser possível distinguir os diferentes tamanhos de grão e, deste modo, poder calcular granulometrias. Assim, a marcação da separação das camadas, coincidente com os locais de corte, e a identificação do tipo de massa foi efetuada manualmente no terreno e de seguida, efetuou-se o registo fotográfico com o drone. A Figura 49 é uma aproximação do ortofoto da Figura 48, no qual se pode observar a marcação tracejada da divisão das camadas de estratificação e designação do tipo de massa. Com base nessa marcação, efetuou-se a medição do volume de material vendável, conforme a Figura 50, tendo-se obtido, na subtalhada escolhida para exemplo, 346 t do tipo de massa Beije ML e 66 t da massa ML Mix.

Para além da previsão do volume vendável da talhada, pode-se fazer também uma análise dos cortes de esquadramento e esquartejamento e estimar o número de blocos que irão resultar dessa talhada. Assim, pela observação da Figura 51 e com base na marcação efetuada no terreno, podemos verificar que, na subtalhada em questão, serão efetuados 3 cortes de separação de massa com serrote de bancada com um total de 29m lineares (linhas a vermelho), sendo necessário que as retroescavadoras com serrote efetuem 1 corte de 9.5m (linha a amarelo) para complementar os cortes de esquartejamento. Posteriormente, para a criação dos blocos será necessário que as retroescavadoras com serrote efetuem 5 cortes com um total de 36.7m (linhas a azul), originando no mínimo 16 blocos comercializáveis.

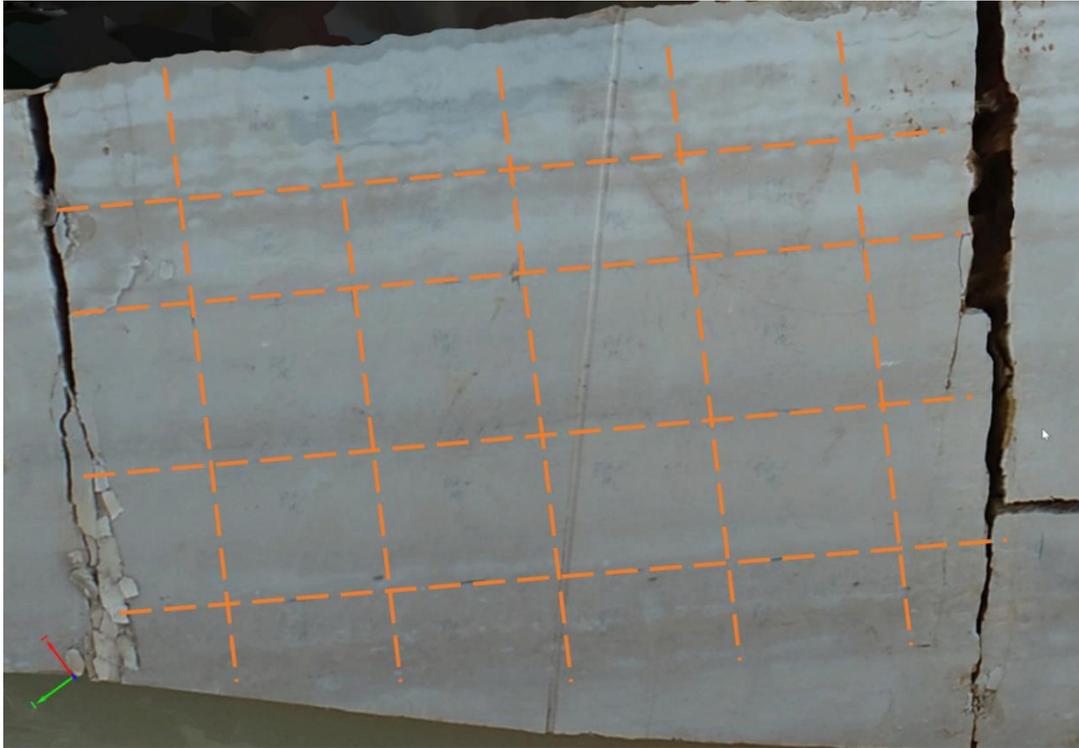


Figura 49: Aproximação do ortofoto da Figura 48 com pormenor da marcação da talhada, representada pelas linhas tracejadas a cor de laranja

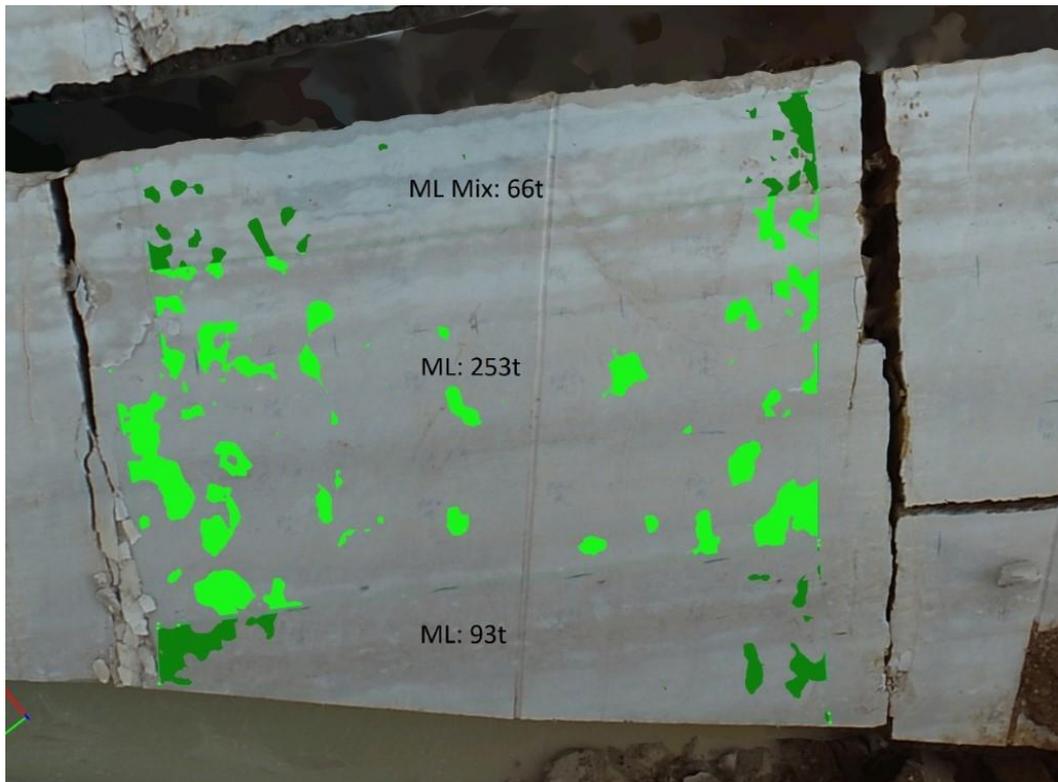


Figura 50: Medição do volume, representado pela cor verde na imagem, de material vendável por tipo de massa numa subtalhada

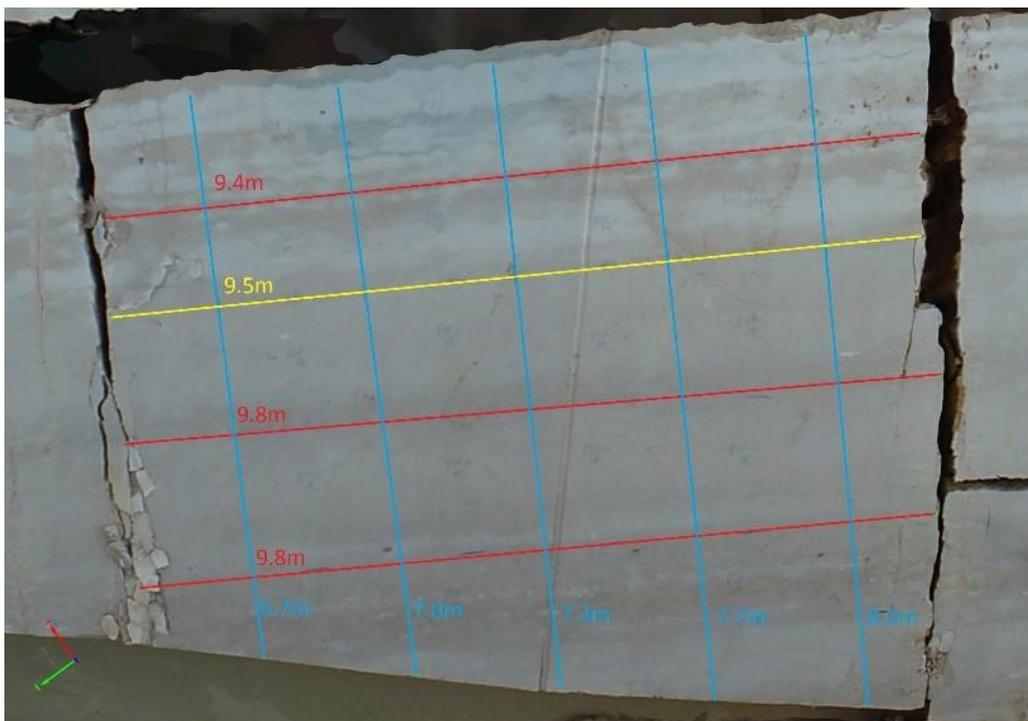


Figura 51: Cortes de esquadramento (vermelho) e esquartejamento (azul e amarelo) necessários para finalizar os blocos com valor ornamental

4.2. Medição de volumes

4.2.1. Medição do volume das pilhas de agregados – Unidade de Britagem

Para realizar a medição do volume do stock de agregados disponíveis na unidade de britagem, foi efetuado um voo em grelha dupla com uma área de cobertura de aproximadamente 23.4 ha (234 000 m²), uma duração de 32 minutos e um total de 789 imagens. O voo foi realizado a uma altura de 70 m do ponto de descolagem, a uma velocidade de voo de 4.2 m/s, um ângulo da câmara com a horizontal de 60° e uma sobreposição lateral e frontal de 85%. Do processamento resultou um GSD de 2.82 cm/pixel e um erro RMSE de georreferenciamento de 8 mm. A nuvem de pontos gerada possui 192 972 938 pontos, com uma densidade média de 376.7 pontos/m², o que contribui para uma melhoria na precisão do volume comparativamente aos métodos clássicos. O modelo digital de terreno apresenta um GSD de 14.1 cm/pixel (5 vezes o valor do GSD da nuvem de pontos).

Como realizado anteriormente, o processamento dos dados foi iniciado pelo alinhamento das imagens capturadas. Durante esta etapa, 4 imagens não ficaram calibradas, ou seja, não foi encontrada correspondência alguma com imagens adjacentes, pelo que foram desativadas para não serem utilizadas na criação dos pontos de ligação (Figura 52). A impossibilidade de calibração destas imagens deveu-se ao facto de duas das imagens se encontrarem desfocadas e as outras duas apresentarem uma superexposição (imagens demasiado claras), conforme exemplo da Figura 53.

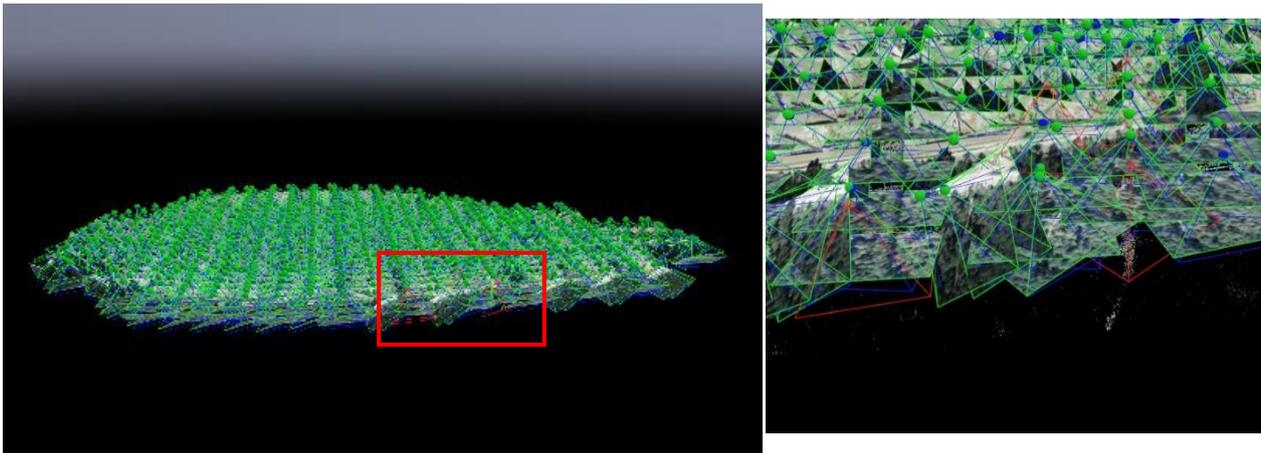


Figura 52: Processo de calibração das imagens. A azul a posição inicial das imagens, a verde a posição calculada das imagens que ficaram bem calibradas e a vermelho as imagens que ficaram mal calibradas.



Figura 53: Exemplo de uma das imagens desfocadas (à esquerda) e de uma das imagens superexpostas (à direita)

Após ter-se realizado a calibração das imagens capturadas, foram criados os pontos de ligação que, após a colocação dos 3 pontos de controlo medidos no terreno, permitiram criar a nuvem esparsa de pontos e conseqüentemente a nuvem densa de pontos (Figura 54 e 55 respetivamente). Comparando com o levantamento efetuado à área da pedreira, o levantamento da britadeira deu origem a um modelo com maior ruído devido à maior concentração de poeiras na área mapeada, resultantes do processo de cominuição.



Figura 54: Nuvem de pontos esparsa (pontos de ligação) do levantamento efetuado na unidade de britagem



Figura 55: Nuvem de pontos densa do levantamento efetuado na unidade de britagem

A medição de volumes foi efetuada através da ferramenta “Volumes” disponibilizada pelo Pix4DMapper que permite calcular volumes de objetos diretamente na nuvem densa de pontos, com base no Modelo Digital de Superfície gerado. No entanto, a nuvem de pontos densa possui objetos não relevantes que influenciam o cálculo dos volumes, uma vez que o volume é medido desde a superfície base, até ao ponto mais alto do objeto. Deste modo, os objetos acima do volume de interesse, neste caso as telas transportadoras e os tubos de saída do produto, são incorporados no volume total a medir. Assim, é fundamental que antes de se iniciar a medição

do volume dos stocks, seja efetuada uma filtragem dos dados da nuvem de pontos de forma a remover as estruturas indesejáveis. Para isso, marcou-se as áreas da nuvem de pontos correspondentes aos objetos a excluir e atribuiu-se a classe “Objetos desativados” (Figura 56), para que não fossem utilizados na construção do Modelo Digital de Superfície nem utilizados nos cálculos de volume das pilhas. As Figura 57 (a) e (b) correspondem à nuvem de pontos antes e após o processo de classificação supervisionada para remoção das telas transportadoras e saídas de produto.

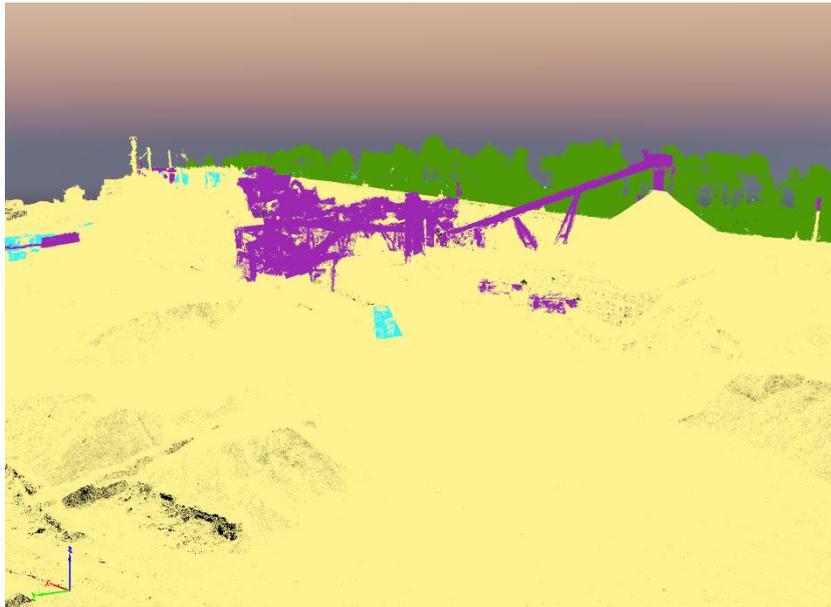


Figura 56: Classificação da nuvem de pontos: a roxo as estruturas a desativar da nuvem de pontos, a azul algumas estruturas manufactureras, a verde a vegetação e a amarelo o solo e stocks

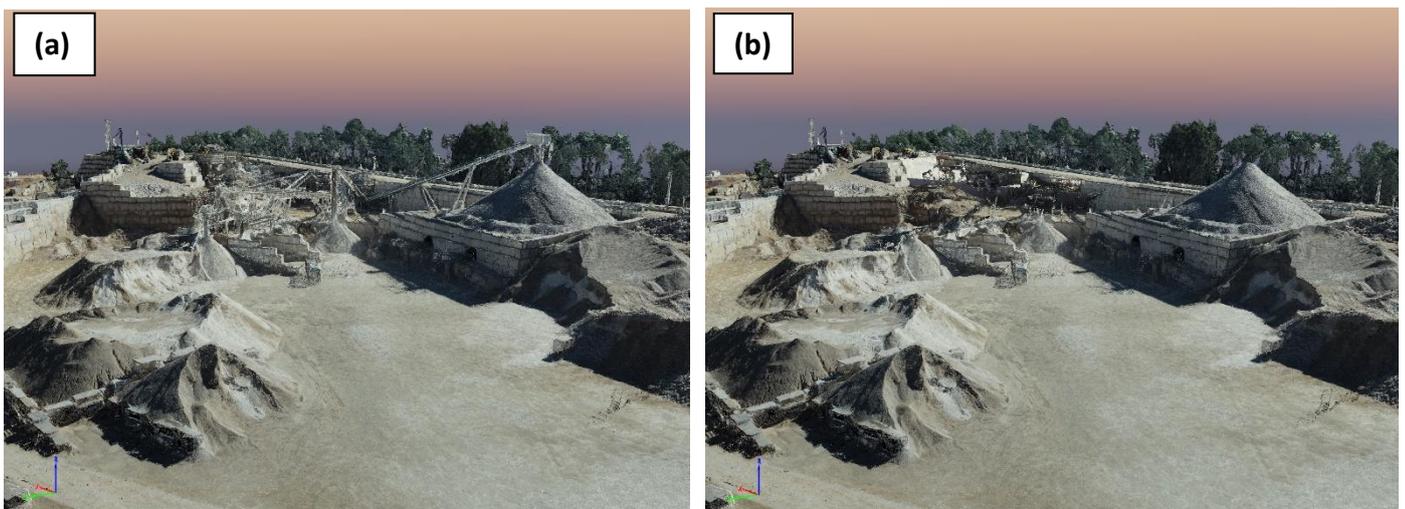


Figura 57: Nuvem de pontos antes (a) e após (b) a classificação, com conseqüente remoção das telas transportadoras e tubos de saída do produto

Após o processo de classificação, é necessário gerar novamente o MDS de forma a que os objetos incluídos na classe “Objetos desativados” sejam removidos do modelo atual. A Figura 58 corresponde ao modelo digital de superfície após a eliminação das telas de transporte e tubos de saída de produto. Tanto na Figura 57 (b) como na Figura 58, é possível verificar que a remoção das estruturas pertencentes à unidade de britagem foram removidas com sucesso, permitindo isolar as pilhas de inertes e efetuar o cálculo de volumes sem influencia dos objetos envolventes.

Para efetuar a medição do stock de agregados, selecionou-se a área da pilha a medir e optou-se por utilizar como base de referência o ponto mais baixo do piso envolvente (à exceção da pilha de brita 30/80 mm cuja descarga é efetuada diretamente para uma caixa, tendo-se atribuído como base de referência a cota do fundo dessa caixa de armazenamento). A Figura 59 apresenta alguns exemplos de diferentes pilhas medidas com o software Pix4DMapper, sendo possível identificar duas cores distintas, a verde a área correspondente ao Volume de Corte, quando o objeto alvo de medição se encontra acima da superfície de base e a vermelho o Volume de Preenchimento quando o objeto se encontra abaixo. O volume total do objeto, neste caso da pilha de inertes, corresponde ao somatório desses dois volumes. A Figura 60 corresponde ao ortofoto da unidade de britagem gerado no processamento dos dados.

Pode-se concluir que as imagens dos veículos aéreos não tripulados podem ser facilmente utilizadas na geração de nuvens de pontos e modelos digitais de superfície com precisão centimétrica, de forma a criar uma reconstrução 3D das pilhas de stock com uma grande quantidade de pontos, permitindo fazer cálculos de volume com elevada exatidão (sendo que o nível de erro no cálculo dos volumes do Pix4DMapper depende da resolução espacial do GSD), o que não era possível com os métodos tradicionais devido à forma irregular e à menor quantidade de pontos recolhidos dos mesmos. Os VANTs revelam-se deste modo, uma ferramenta rápida e fiável para a medição e monitorização das pilhas de agregados, permitindo realizar relatórios de inventário mensais ou até semanais e comparar os dados ao longo do tempo.

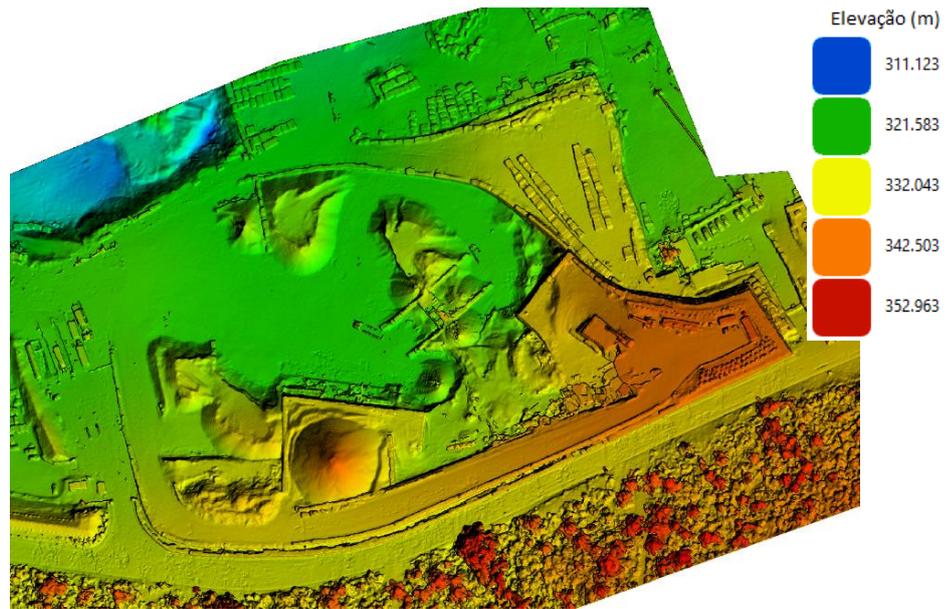


Figura 58: Modelo digital de superfície após a eliminação das telas de transporte

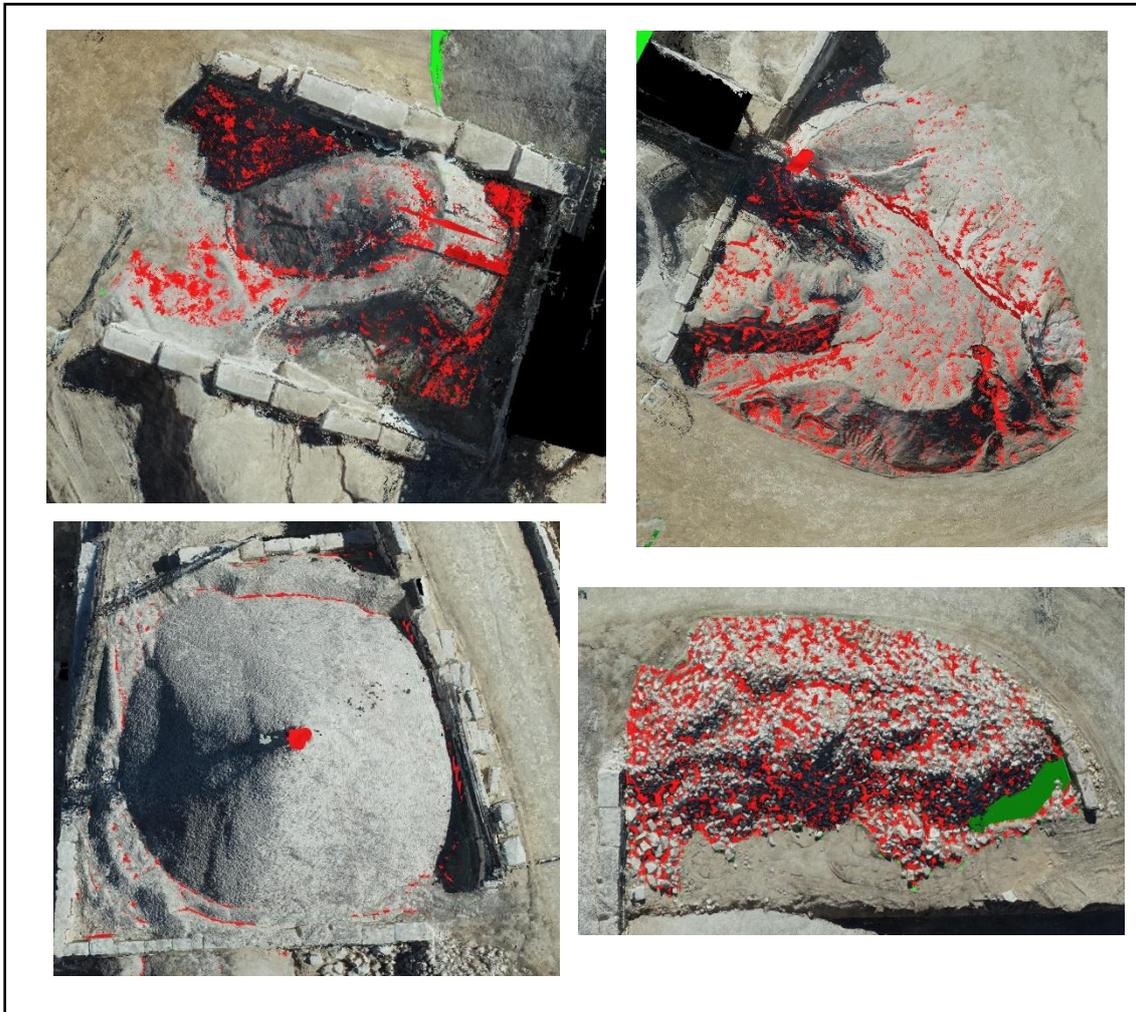


Figura 59: Exemplos de algumas pilhas de agregados medidas com o software Pix4DMapper



Figura 60: Ortofoto da unidade de britagem

4.2.2. Análise da capacidade de medição de volumes

De forma a estudar a fiabilidade do cálculo de volumes com recurso a dados de VANT, efetuaram-se duas análises, a primeira de uma pilha de brita, representando o caso de um volume irregular, e a segunda de uma fila de blocos, representando o caso do cálculo de volumes de objetos regulares.

Análise de volumes – Pilha de brita

Para efetuar a primeira análise de volumes, utilizou-se o modelo obtido com o levantamento topográfico realizado na unidade de britagem. Partindo do princípio que a pilha de Brita 30/80 mm pode ser definida geometricamente como uma aproximação ao volume de um cone, correspondente ao monte de deposição do material, e a um prisma trapezoidal correspondente à caixa, tal como representado na Figura 61, calculou-se o volume do mesmo, tendo-se obtido um volume de 8 748.5 m³. Mediu-se o mesmo volume na nuvem de pontos, recorrendo ao software Pix4DMapper, no qual resultou um volume de 9 027.7 m³, uma diferença de 0.6%. Deste modo, pode-se considerar que a medição de volumes a partir da nuvem de pontos, obtida através do processamento das imagens de VANTs, constituem uma ferramenta prática e fiável para a gestão de stocks de pilhas de agregados.

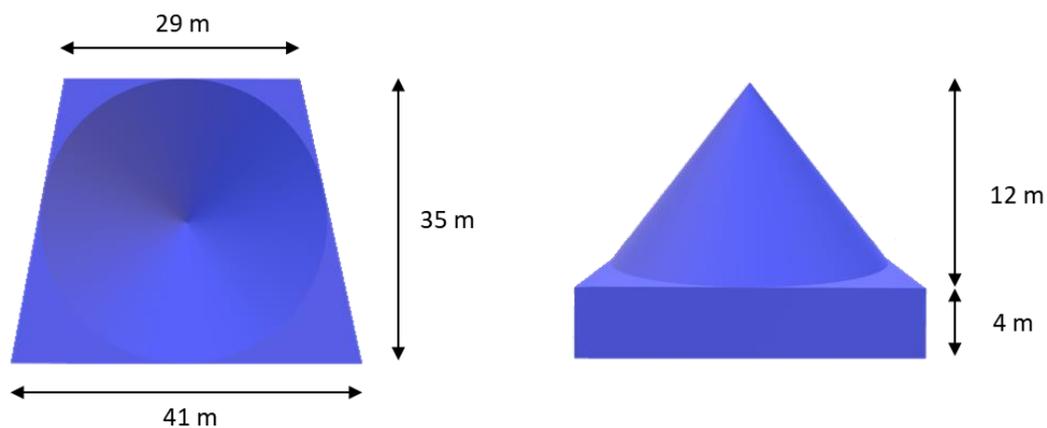


Figura 61: Representação geométrica da pilha de brita 30/80mm.

Análise de volumes - Parque de blocos

Para a realização da segunda análise do cálculo de volumes, efetuou-se um levantamento da área de um parque de stock de blocos, cobrindo uma área de 251 705.5 m², com uma duração de 39 minutos e 1 028 imagens capturadas. O voo foi realizado a 75 m de altura do ponto de descolagem, a uma velocidade de voo de 5.9 m/s, um ângulo de inclinação da câmara 65° com a horizontal e uma sobreposição frontal e lateral de 80%. Desse levantamento, selecionaram-se três filas (Figura 62), contabilizando um total de 101 blocos e realizou-se a medição dos volumes com recurso ao Pix4DMapper. Os volumes medidos encontram-se na Tabela 5.



Figura 62: Medição do volume de 101 blocos ornamentais dispostos em filas no parque de blocos

Tabela 5: Cálculo dos volumes dos blocos por massa (sendo que cada fila corresponde a um tipo de massa, identificadas presencialmente) com recurso ao software Pix4DMapper

Designação	Área	Volume	Erro Volume	Volume Corte	Erro Volume	Volume Total	Erro Volume	Volume	Volume
	Terreno 3D (m2)	Enchimento (m3)	Enchimento (m3)						
Mix ML	381,25	-0,69	0,19	273,14	6,55	272,46	6,74	76,25	196,21
Blue ML	247,66	-0,18	0,06	177,00	4,46	176,82	4,52	49,53	127,29
Beije ML	401,68	-1,74	0,47	254,05	6,51	252,30	6,98	80,34	171,97
Total	1 030,58	-2,61	0,51	704,19	10,25	701,58	10,70	206,12	495,46

A partir dos volumes dos blocos calculados, determinou-se o seu peso, multiplicando o volume pela massa volúmica do calcário (considerou-se um valor de 2,5 t/m³ para a massa volúmica do calcário, valor disponibilizado pela empresa Filstone – Comércio de Rochas, S.A., segundo as fichas técnicas dos produtos finais), tendo sido necessário retirar o volume das bases de apoio dos blocos, conforme a Tabela 5. De seguida, comparou-se o resultado obtido com o peso real dos blocos. Pela Tabela 6, podemos observar que se obteve individualmente uma diferença absoluta de 4% em duas filas e de 5% em uma fila. No entanto, analisando o conjunto de dados dos 101 blocos, obteve-se uma diferença de 2% entre o peso obtido pela medição do volume da nuvem de pontos e o volume real dos blocos, o que nos permite concluir que os VANTs permitem obter resultados bastante credíveis na medição de volumes de objetos, quer estes tenham uma forma regular ou irregular.

Tabela 6: Comparação do peso dos blocos obtido pelo cálculo do volume com recurso ao software Pix4DMapper e da sua pesagem

Designação	Pesagem		Medição	Diferença
	Nº Blocos	Peso (t)	Peso Blocos (t)	
Mix ML	34	512,86	490,52	4%
Blue ML	26	303,27	318,22	5%
Beije ML	41	449,92	429,92	4%
Total	101	1 266,05	1 238,65	2%

4.3. Análise da drenagem das águas superficiais - Oficinas

A Figura 63 é um extrato do ortofoto obtido no mapeamento da pedra (Figura 41), com destaque na zona das oficinas de forma a estudar a drenagem das águas superficiais. A Figura 64 (a) corresponde ao Modelo Digital de Superfície, a partir do qual se criou o Modelo Digital de Terreno (Figura 64 (b)), eliminando a informação referente à vegetação e todas as edificações através da filtragem do mesmo, essencial para a realização do processo de extração da rede de drenagem.



Figura 63: Extrato do ortofoto resultante do levantamento efetuado à área da pedreira, com destaque na zona das oficinas

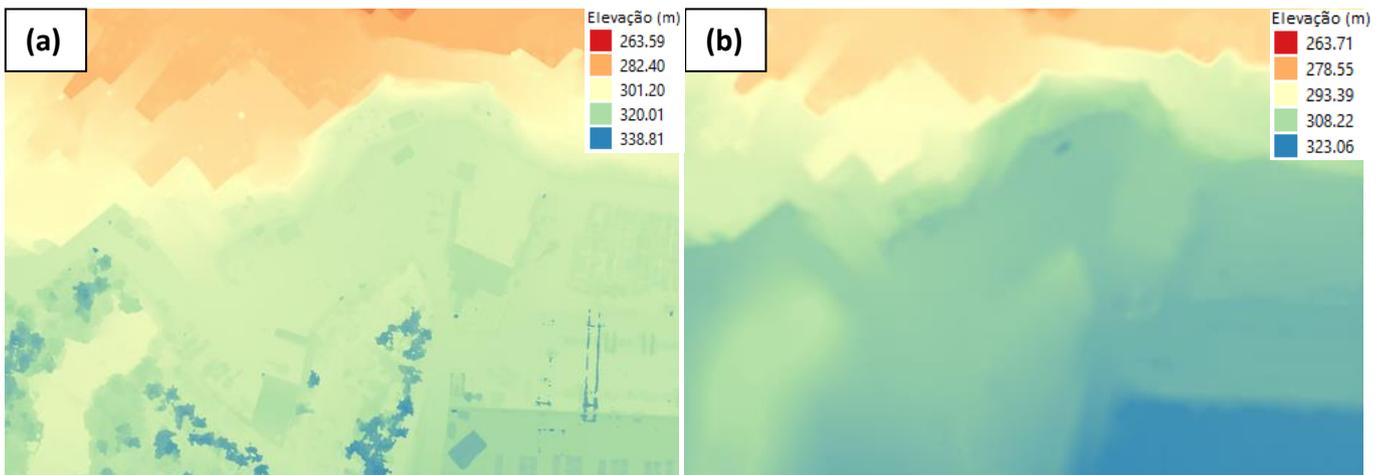


Figura 64: Modelo digital de superfície (a) e modelo digital de terreno (b) da área envolvente das oficinas

Como descrito no capítulo da metodologia, o primeiro passo para identificar a rede de drenagem é definir a direção do escoamento de água. Deste modo, aplicou-se a ferramenta de Direção de fluxo 'FlowDirection (in_surface_raster, {force_flow}, {out_drop_raster}, {flow_direction_type})' definida com o algoritmo D8 ao Modelo Digital de Terreno e obteve-se um mapa com a direção do escoamento das águas (Figura 65), que permite de seguida determinar as zonas onde existe maior ou menor acumulação de fluxo. A cor vermelha na figura representa os locais onde existe uma maior probabilidade para o fluxo de águas, enquanto a cor azul identifica as áreas onde existe um baixo nível de escoamento. Quando comparado com o Modelo Digital de Terreno, podemos concluir que os locais com maior escoamento de águas correspondem às zonas onde há uma maior declividade do terreno.

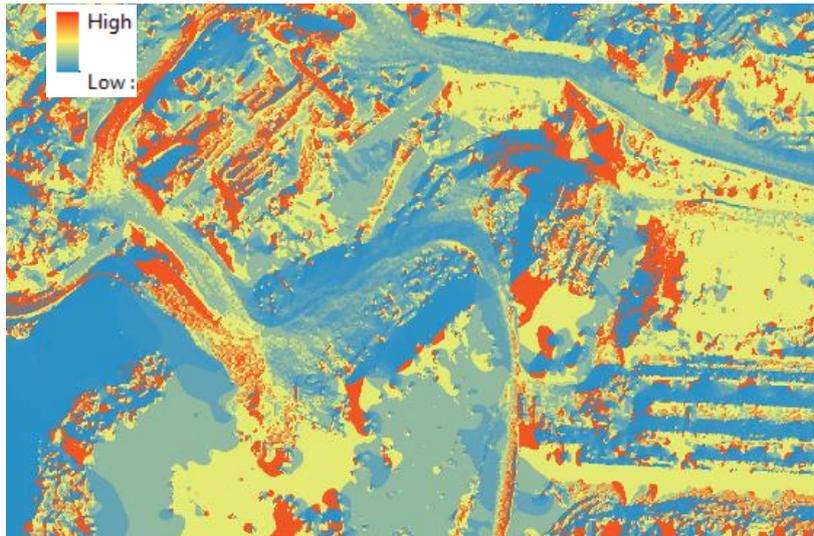


Figura 65: Mapa do escoamento das águas superficiais. A cor vermelha identifica os locais onde a probabilidade para haver ocorrência das águas é maior, enquanto a cor azul representa os locais onde essa probabilidade é menor.

Após a obtenção do mapa de direção de fluxo, calcula-se os locais onde de facto pode existir concentração ou acumulação desses fluxos de água. Para isso aplicou-se a ferramenta 'FlowAccumulation (in_flow_direction_raster, {in_weight_raster}, {data_type}, {flow_direction_type})', resultando o mapa da Figura 66. Neste mapa, também a cor vermelha representa os locais onde existe uma maior acumulação de água, enquanto que a cor azul representa os locais onde a acumulação é nula.



Figura 66: Mapa de acumulação de fluxo

Por fim, calculou-se os locais onde o número de células que fluem para cada célula adjacente era superior a 100, 500 e 1000 (Figura 67).

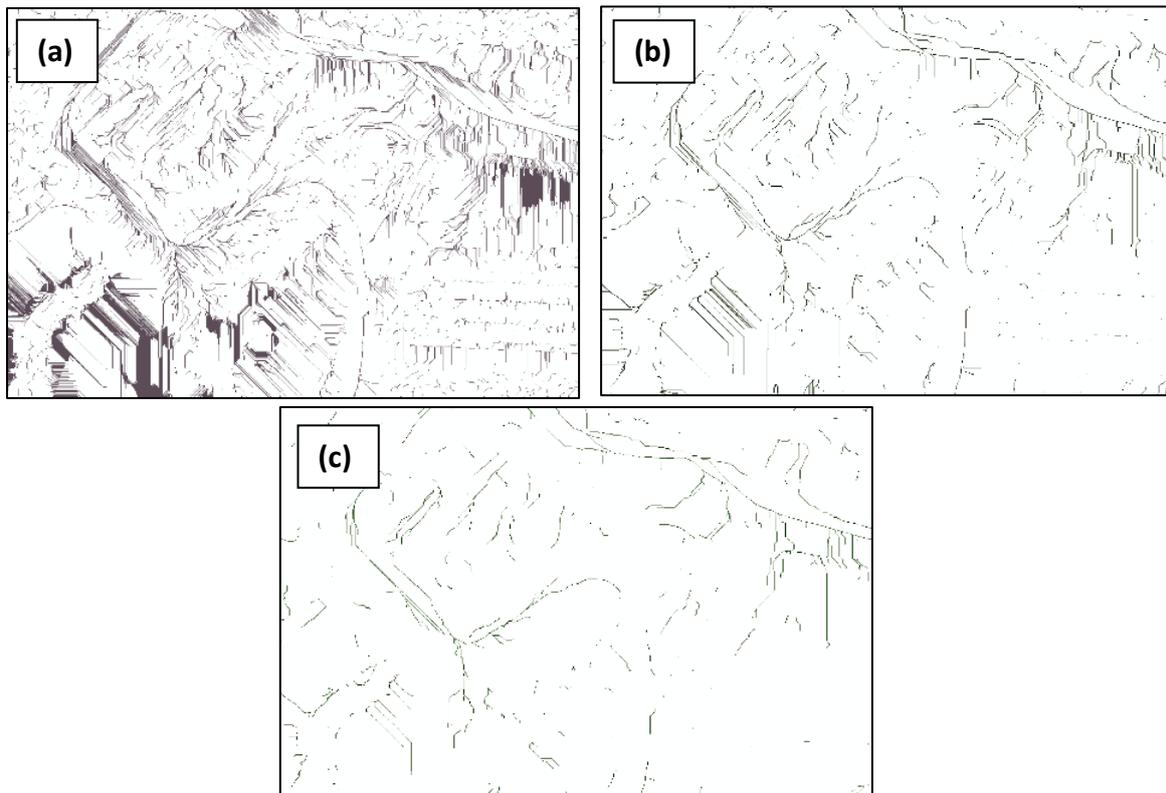


Figura 67: Extração da rede de drenagem com base no número de células de fluem para cada célula: superior a 100 (a), superior a 500 (b) e superior a 1000 (c)

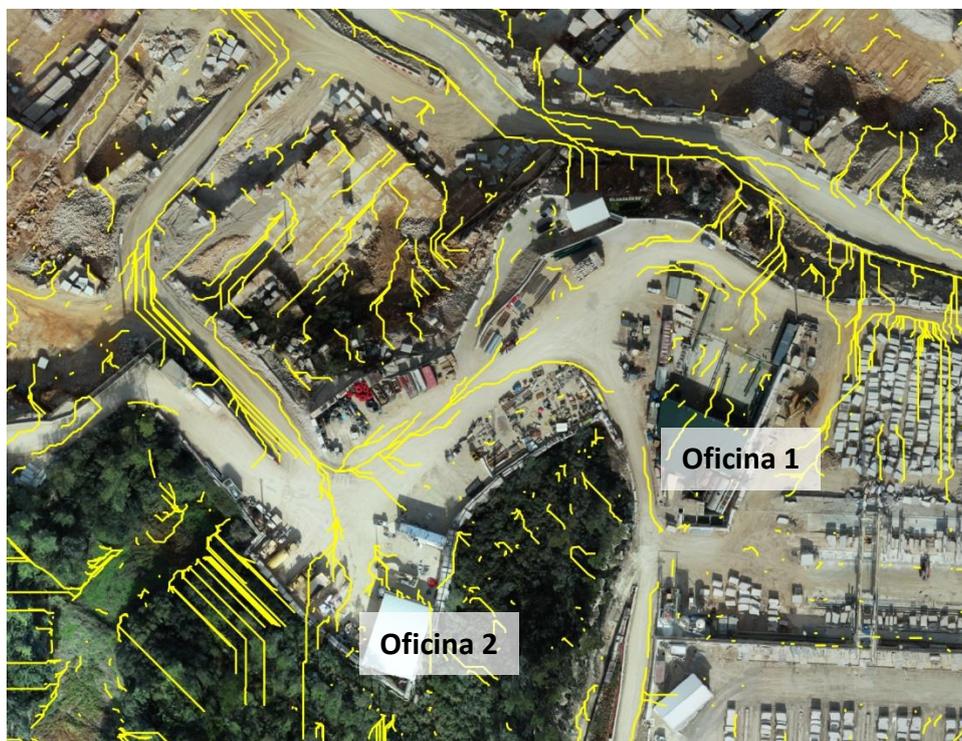


Figura 68: Rede de drenagem sobreposta no ortofoto da área das oficinas

Após análise dos resultados do fluxo condicionado, escolheu-se utilizar os dados cujos fluxos foram formados pela receção de pelo menos 500 células vizinhas, conforme representado na Figura 67 (b). Desta forma, extraiu-se a rede de drenagem a partir desses valores cumulativos, resultando a rede apresentada na Figura 68.

Pela observação da Figura 68, podemos notar que os principais canais de drenagem da água têm como origem as zonas das oficinas assim como a zona de lavagem de máquinas localizada na lateral direita da oficina 1, sendo que o fluxo de águas é encaminhado pela topografia do terreno para a zona de exploração a partir das rampas de acesso ou dos taludes da corta da pedreira.

As oficinais e zonas de lavagem correspondem a áreas de manutenção de máquinas e equipamentos, nas quais são produzidos resíduos, tais como pneus usados, sucatas, óleos usados, filtros de óleo, baterias de chumbo e materiais contaminados com hidrocarbonetos, que devem ser geridos e devidamente encaminhados ou não consoante o seu nível de perigosidade para o meio ambiente. Deste modo, é necessário garantir que não existe contaminação do solo ou dos recursos hídricos existentes.

Após a deteção do problema de drenagem das águas pluviais e de forma a diminuir os impactos ambientais decorrentes da indústria extrativa, a empresa Filstone – Comércio de Rochas, S.A. está a realizar um projeto de construção de valas de drenagem superficiais em redor de toda a corta de forma a impedir a escorrência de águas pluviais para dentro da mesma. A empresa está também a tomar especial atenção e a desenvolver um projeto para a construção de uma fossa separadora de hidrocarbonetos. Deste modo, todas as tarefas de manutenção e lavagem de equipamentos e máquinas devem ser efetuadas em piso impermeável, no qual os efluentes líquidos com hidrocarbonetos gerados nas oficinas devem ser recolhidos num sistema de drenagem e conduzidos para uma fossa separadora de hidrocarbonetos, que deverá ser limpa periodicamente por uma entidade licenciada. Na área da oficina, a água pluvial deve ser também encaminhada para um separador de hidrocarbonetos, cujo efluente é rejeitado na bacia de decantação. A água armazenada na bacia de decantação pode ser utilizada na beneficiação, na zona de corte por bifios, no qual é necessário utilizar água para realização dos cortes.

Podemos assim concluir que os VANTs constituem também uma forte ferramenta de apoio e gestão dos recursos hidrogeológicos e ambientais, ajudando a detetar anomalias de forma rápida e eficiente, levando a uma solução mais célere e bem estruturada.

4.4. Análise do impacto da atividade extrativa na vegetação – Núcleo Extrativo Casal Farto

Para avaliar o impacto da atividade extrativa do núcleo de pedreiras no ambiente envolvente, analisou-se a variação temporal do sinal espectral da cobertura de vegetação de forma a determinar a deposição de poeiras. Foram testados diferentes índices de vegetação baseados em imagens RGB, em dois períodos temporais diferentes em que a criação de poeiras é bastante distinta, uma num mês seco, com pouca precipitação e temperaturas elevadas (final de setembro) e outra num mês húmido, com elevada precipitação e temperaturas baixas (fim de

fevereiro). As imagens RGB (ortofotos) utilizadas para este estudo encontram-se na Figura 69, tendo-se destacado o local de deposição de poeiras junto à Britadeira Fixa, na parte inferior direita das imagens.



Figura 69: Ortofotos da área da unidade de britagem no período de tempo seco (à esquerda) e no período de tempo húmido (à direita) com destaque na zona de deposição de poeiras sobre a vegetação

Como referido na metodologia, testou-se 5 índices de vegetação baseados em imagens RGB, conforme apresentados nas Figuras 70, 71 e 72. Nas imagens calculadas, a vegetação está representada na cor azul e verde (valores positivos do índice), enquanto o solo está representado a laranja e/ou vermelho (valores negativos do índice), sendo que as zonas com vegetação escassa ou rasteira estão representadas a amarelo (valores intermédios/nulos). Deste modo, a deposição das poeiras nas imagens está identificada a amarelo, nas zonas com baixa concentração de poeiras, e a laranja/vermelho nas áreas com maior concentração de poeiras, sendo que as áreas com concentração nula, ou praticamente nula, continuam a ser identificadas com a cor verde, correspondente à categoria da vegetação.

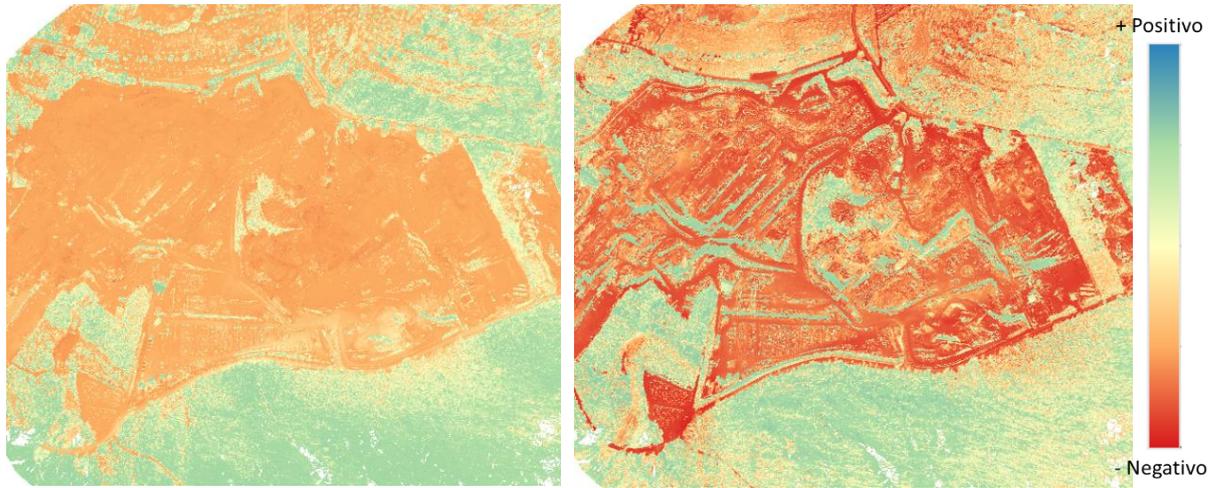


Figura 70: Índice de vegetação VARI (à esquerda) e RGBVI (à direita)

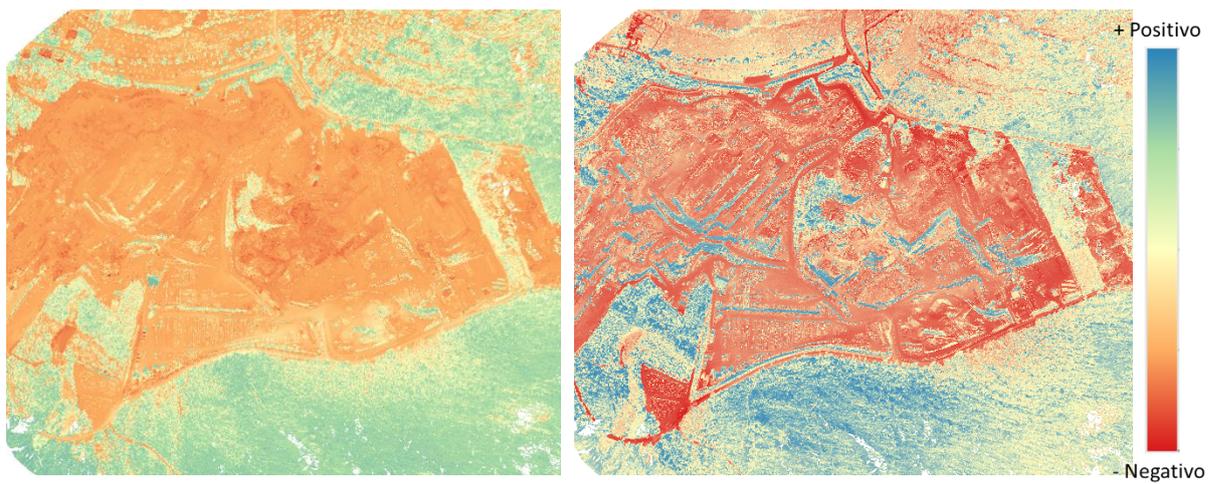


Figura 71: Índice de vegetação MGRVI (à esquerda) e NDVI (à direita)

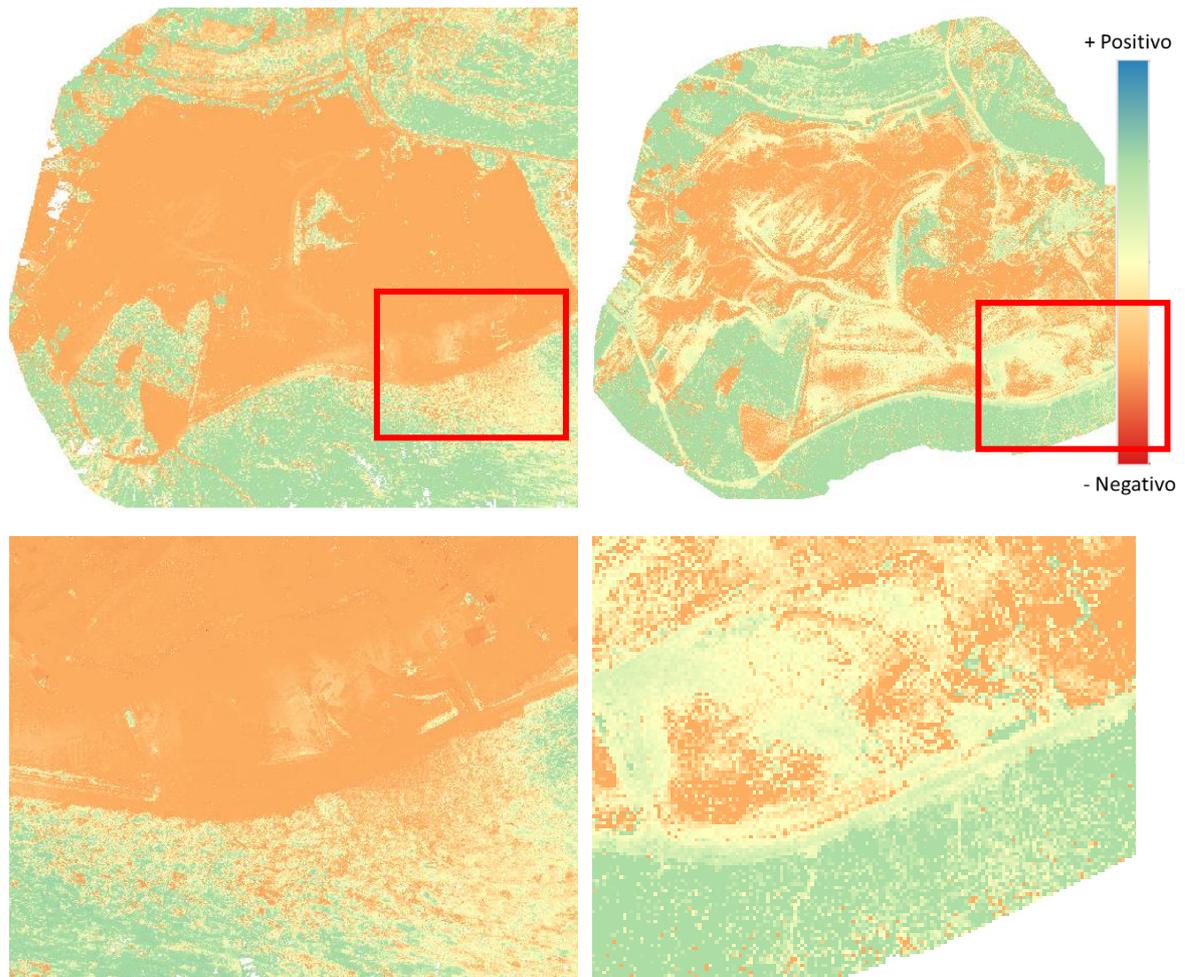


Figura 72: Índice de vegetação GLI no período de tempo seco (à esquerda) e no período de tempo húmido (à direita)

Pela observação do índice VARI (Figura 70-esquerda) e do índice MGRVI (Figura 71-esquerda), podemos verificar que em ambas as figuras, a zona de concentração de poeiras identificada não corresponde na realidade à totalidade da área mais clara identificada no ortofoto da Figura 69 (área correspondente à deposição e dispersão das poeiras). Também a dispersão da poeira se encontra mal representada, sendo que nos índices a poeira junto à unidade de britagem tem uma dispersão na horizontal, enquanto na realidade a poeira está a ser encaminhada para a extremidade inferior direita da imagem, conforme observado no ortofoto da Figura 69.

Relativamente ao índice RGBVI, podemos observar que estão a ser identificadas áreas de vegetação (cor verde) no interior da pedreira que na realidade correspondem a sombras.

No índice NDVI da Figura 71, é possível identificar corretamente a zona de deposição de poeiras juntamente à unidade de britagem, assim como a sua dispersão para a extremidade inferior direita. Por outro lado, existem áreas de vegetação cuja folhagem apresenta cores mais claras e vivas, que estão a ser identificadas com a mesma cor que a área de deposição de poeiras,

concluindo-se deste modo, que o índice NDVI não permite efetuar uma análise clara quanto à influência das poeiras resultantes da indústria extrativa.

O índice de vegetação GLI (Figura 72-esquerda) foi o índice que permitiu gerar o melhor resultado quanto à identificação dos locais de deposição e dispersão das poeiras, havendo uma boa distinção entre esses locais, as áreas de vegetação saudável e as áreas correspondentes ao solo. Deste modo, utilizou-se o índice GLI para avaliar o impacto das poeiras na vegetação envolvente também durante o mês de fevereiro, período de chuvas (Figura 72-direita). No período de chuvas algumas áreas correspondentes ao solo também se encontram a amarelo (cor correspondente ao grupo que inclui a vegetação escassa ou rasteira), possivelmente influenciadas pela acumulação da água pluvial, pelo que se pode concluir que o índice GLI apresenta melhores resultados na distinção de vegetação e solo em períodos de tempo seco. Por outro lado, é possível identificar uma diminuição da acumulação de poeiras junto à unidade de britagem nos períodos de tempo húmido, com o aumento espacial dos valores positivos do índice e que representam as áreas de vegetação. Pode-se concluir assim, que o índice de vegetação GLI funciona como boa ferramenta para avaliar a evolução temporal e espacial do impacto das poeiras, provenientes da indústria extrativa, sobre a vegetação envolvente.

Após a identificação do problema associado à libertação de poeiras proveniente da cominuição das peças de alvenaria e rachão, utilizados para a produção de agregados, e de modo a diminuir o impacto no meio ambiente envolvente, a empresa Filstone- Comércio de Rochas, S.A. está a desenvolver um projeto de encapsulamento da unidade de britagem e o ensilamento das britas industriais.

A utilização do veículo aéreo não tripulado, embora equipado apenas com câmara RGB neste trabalho, demonstrou ser mais uma vez uma ferramenta útil e de fácil utilização na inspeção e avaliação do impacto da indústria extrativa sobre o meio ambiente envolvente, em específico os locais com maior deposição de poeiras, detetáveis a partir das respostas espectrais da cobertura da vegetação.

5. Conclusões e trabalhos futuros

Do ponto de vista operacional, o VANT Phantom 4 RTK utilizado na presente dissertação apresentou uma boa capacidade técnica em obter dados de campo em qualidade e quantidade adequadas, sendo de fácil compreensão os procedimentos necessários à realização dos levantamentos aéreos assim como o seu manuseio. Apesar do VANT possuir tecnologia RTK, nas quais as coordenadas de cada imagem são corrigidas em tempo real, é recomendável a utilização de pontos de controlo no terreno de forma a aumentar a exatidão e precisão do modelo. No geral, após a introdução dos pontos de controlo, verificou-se que o modelo sofre uma translação das coordenadas para Noroeste (cerca de 41 cm para Oeste e 76cm para Norte) e uma diminuição na altitude de 37cm. Concluiu-se ainda que um maior número de GCPs por área de voo não garante uma diminuição proporcional do erro no georreferenciamento.

Também o software Pix4DMapper utilizado para o processamento dos dados recolhidos em campo é de fácil utilização, permitindo obter os principais produtos fotogramétricos tais como: nuvem de pontos, malha 3D texturizada, modelos digitais de elevação, curvas de nível e ortofotos. No entanto, o software Pix4DMapper exige que seja utilizado um computador com um bom processador e com uma grande quantidade de memória RAM disponível, caso contrário, o processamento dos dados poderá tornar-se bastante demorado e levar vários dias até ser concluído.

Como vantagens da utilização de VANTs na indústria extrativa, em substituição dos métodos tradicionais, pode-se destacar a maior rapidez da aquisição dos dados, aliada a uma maior precisão e criação de rotinas, que permitem dar apoio às operações de mineração, possibilitando a tomada de decisões bem informadas e com maior rapidez.

Relativamente aos objetivos específicos, pode-se concluir que a utilização de dados VANT constituem uma forte ferramenta para o acompanhamento e planeamento do desmonte, através da criação de modelos 3D da zona de exploração, permitindo calcular as dimensões e o volume a extrair em cada frente de trabalho, para além de possibilitar o registo fotográfico do volume aproveitável e dos cortes necessários para a finalização dos blocos comercializáveis. No entanto, contrariamente ao esperado no início do desenvolvimento da presente dissertação, não foi possível distinguir através das imagens os tipos de massa de cada um dos filões existentes na talhada, uma vez que, sendo as massas distinguidas pela dimensão e dispersão dos grãos na matriz rochosa, seria necessário que o VANT efetuasse a captura das imagens muito próximo da superfície, de forma a aumentar a resolução espacial da mesma e ser possível distinguir as granulometrias.

No que diz respeito ao cálculo de volumes, em específico o cálculo de stocks de agregados, a utilização de dados VANT para além de aumentar a precisão do cálculo dos volumes das pilhas, promove também o aumento da segurança dessas tarefas. A rápida aquisição dos dados permite um rastreamento mais completo das alterações, permitindo efetuar as medições de volume semanalmente ou mensalmente de forma a ajudar a tomar melhores decisões de negócios.

Comparando os valores de volume obtidos pela nuvem de pontos no software Pix4DMapper e o modelo matemático da pilha de inerte e o peso real dos blocos dispostos nas filas, obteve-se uma diferença de 0.6% e 2% respetivamente. Podemos deste modo concluir que as imagens obtidas com recurso a VANTs constituem uma ótima ferramenta para calcular volumes com uma elevada precisão e confiabilidade.

A elevada precisão dos produtos finais resultantes do processamento dos dados dos VANTs contribuem também para o estudo da rede de drenagem das águas superficiais, servindo como ferramenta para a análise e correção do encaminhamento do fluxo de águas, de forma a evitar a contaminação dos recursos hídricos ou do solo.

Por último, pode-se também concluir que as imagens capturadas pelos VANTs constituem igualmente um método de baixo custo para avaliar o impacto que a indústria extrativa tem sobre a vegetação envolvente, a partir do cálculo de índices de vegetação baseados, neste caso, em imagens RGB. Concluiu-se que o índice de vegetação GLI foi o que apresentou os melhores na distinção entre solo e vegetação, permitindo identificar também a área de deposição e dispersão das poeiras resultantes da indústria extrativa. O cálculo do índice GLI obteve melhores resultados na distinção da vegetação e do solo no período de tempo seco. No entanto, o índice permitiu identificar não só o local de deposição como a diminuição da área de deposição no período de tempo húmido.

Podemos concluir que a utilização de dados VANT na indústria extrativa permite otimizar os processos com maior agilidade, precisão, segurança e economia, contribuindo para uma melhor gestão dos recursos, antecipando situações e, dessa forma, poder planejar estrategicamente as decisões a serem tomadas, ficando-se com um registo fotográfico e de modelos de relevo bastante detalhados de toda área de interesse e respetiva envolvência ao longo do tempo.

Deste modo, a dissertação cumpriu os seus objetivos gerais e específicos sob o ponto de vista prático e científico, apresentando resultados bastante interessantes e ainda pouco conhecidos, tanto para a comunidade académica como para a indústria extrativa, possibilitando o desenvolvimento de estudos mais aprofundados da utilização de dados de VANT em áreas mais específicas no campo da extração, beneficiamento, tratamento ou mesmo gestão dos produtos finais da indústria extrativa. Com base no trabalho desenvolvido na presente dissertação, sugere-se como exemplo de estudos futuros, a realização do modelo de fraturação do maciço rochoso e conseqüente análise da blocometria da pedreira, de forma a apoiar o planeamento e prever a recuperação comercial das bancadas, realizar a análise quantitativa da poeira proveniente da atividade extrativa como ferramenta de apoio aos estudos de impacto ambiental e efetuar o estudo da estabilidade dos taludes a partir dos modelos digitais de terreno..

6. Bibliografia

AGISOFT LLC (2016). Agisoft PhotoScan User Manual - Professional Edition, Version 1.2
Consultado em 2020, Setembro 7

Agra, R. V. (2014). Aplicação do modelo PDCA 90-10 na gestão de ativos de minas a céu aberto. Dissertação para a obtenção do título de Mestre. Disponível em https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-22102014-120207/publico/DISS_Richardson.pdf

Aguiar, J., Faria, M., Luís, A., Ribeiro, J., Saraiva, J. & Sousa, A. J. (2003). Sistema Integrado de Planeamento de Explorações de Rochas Ornamentais. Conferência: Congresso Internacional da Pedra Natural – Arquitectura e Construção. Lisboa. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/266184005_Sistema_Integrado_de_Planeamento_de_Exploracoes_de_Rochas_Ornamentais

Aguilera, D., Hernández, J., Taboada, J., González, P., López, D., García, B., Sanz, I., Perez, B., (2012) 3D Modelling and Accuracy Assessment of Granite Quarry using Unmanned Aerial Vehicle. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I-3

Alvarado, M., Gonzalez, F., Fletcher, A., & Doshi, A. (2015). Towards the development of a low cost airborne sensing system to monitor dust particles after blasting at open-pit mine sites. *Sensors (Switzerland)*, 15(8). doi: 10.3390/s150819667

APRH (2007). WGS84. Consultado em 2021, Abril 12 em <https://www.aprh.pt/rgci/glossario/WGS84.html>

Arai, K., Shigetomi, O., Gondoh, K. & Miura, Y. (2016). Method for NIR Reflectance Estimation with Visible Camera Data based on Regression for NDVI Estimation and its Application for Insect Damage Detection of Rice Paddy Fields. (IJARAI) International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, 5(11), 17-22. Disponível em https://thesai.org/Downloads/IJARAI/Volume5No11/Paper_3-Method_for_NIR_Reflectance_Estimation_with_Visible_Camera_Data.pdf

ArcGIS (2021). Spatial Analyst. Consultado em 23 de outubro de 2020. Disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/understanding-drainage-systems.html>

Bemis, S., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M., Akciz, S., Thiele, S. & Bangash, H. (2014). Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for Structural Geology and Paleoseismology. *Journal of Structural Geology*. 69. 163-178. doi: 10.1016/j.jsg.2014.10.007.

Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Gnyp, M. & Bareth, G. (2015). Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 39. 79-87. doi: 10.1016/j.jag.2015.02.012.

Brito, J.N. e Coelho, L. (2002). *Fotogrametria Digital* (1ª ed.). Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <https://docplayer.com.br/57286564-Fotogrametria-digital-1-a-edicao-jorge-brito-luiz-coelho-instituto-militar-de-engenharia.html>

Carabassa, V., Montero, P., Crespo, M., Padró, J., Pons, X., Balagué, J., Brotons, L. & Alcañiz, J. (2020). Unmanned aerial system protocol for quarry restoration and mineral extraction monitoring. *Journal of Environmental Management*. 270. doi:10.1016/j.jenvman.2020.110717.

Chen, J., Li, K., Chang, K., Sofia, G. & Tarolli, P. (2015) Open-pit mining geomorphic feature characterization. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 42. 76–86. doi: 10.1016/j.jag.2015.05.001.

- Colomina, I. & Molina, P. (2014) Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 92. 79-97. doi:10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013
- CTIE. (s.d.). Remote Piloted Aerial Vehicles: An Anthology. Consultado em 2020, Dezembro 2 em https://ctie.monash.edu.au/hargrave/rpav_home.html
- Daly, D. (s.d.). A Not-So-Short History of Unmanned Aerial Vehicles (UAV). Consultado em 2020, Agosto 7 em: <https://consortiq.com/media-centre/blog/short-history-unmanned-aerial-vehicles-uavs>
- Diálogo Setorial União Europeia-Brasil. (2017). Estudo Sobre a Indústria Brasileira e Europeia de Veículos Aéreos Não Tripulados. Consultado em 2020, Novembro 5 em http://www.mdic.gov.br/images/publicacao_DRONES-20161130-20012017-web.pdf
- Direção Geral de Energia e Geologia. (s.d.). Guião de Pedreiras. Consultado em 2020, Junho 3 em <https://www.dgeg.gov.pt/media/wzrozybv/gui%C3%A3o-das-pedreiras.pdf>
- DJI. (s.d.). D-RTK 2. Consultado em 2020, Outubro 23 em <https://www.dji.com/pt/d-rtk-2>
- drdrone (n.d.). Phantom 4 RTK technical specifications. Consultado em 2021, Junho 13 em <https://www.drdrone.ca/pages/phantom-4-rtk-technical-specifications>
- DroneEng (s.d.). Consultado em 2021, Janeiro 2 em <https://blog.droneng.com.br/modelos-3d-como-sao-gerados/>
- DroneShow. (2018). DJI anuncia o lançamento global do drone Phantom 4 RTK. Consultado em 2021, Fevereiro 9 em <https://droneshowla.com/dji-anuncia-o-lancamento-global-do-drone-phantom-4-rtk/>
- Dronethusiast (s.d.). The History Of Drones (Drone History Timeline From 1849 To 2019). Consultado em 2021, Outubro 5 em <https://www.dronethusiast.com/history-of-drones/>
- Dunnington, L. & Nakagawa, M. (2017) Fast and safe gas detection from underground coal fire by drone fly over. *Environ Pollut*. 229. 139-145. doi: 10.1016/j.envpol.2017.05.063
- Esposito, G., Mastrococco, G., Salvini, R., Oliveti, M. & Starita, P. (2017). Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy. *Environmental Earth Sciences*, 76(3), 1–16. doi:10.1007/s12665-017-6409-z.
- Fernandes, D. & Grubert, F. (s.d.). Imagens drone/VANTs X Imagens orbitais (satélite). Consultado em 2021, Outubro 3 em <https://pixforce.com.br/imagens-dronevants-x-imagens-orbitais-satelite/>
- FlyPro (s.d.) Anatomia de um drone. Consultado em 2020, Novembro 11 em <https://www.flypro.com.br/pagina/anatomia-de-um-drone.html> 2020
- Gitelson, A., Kaufman, Y., Stark, R. & Rundquist, D. (2002). Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction. *Remote Sensing of Environment*. 80. 76-87. doi: 10.1016/S0034-4257(01)00289-9.
- Gondim, J. C. (2018). Uso de aeronava remotamente pilotada (RPA) para apoio técnico nas atividades de planejamento de mina e projetos de mineração em mina a céu aberto (Dissertação de mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasil). Disponível a partir de https://gallery.mailchimp.com/65aa927659c063a74db0dcac6/files/ed738d02-3d79-417b-8257-e35f790f6374/Dissertacao_JONAS_Dez_2018_Versao_Final.pdf
- González-Aguilera, D., Fernández-Hernández, J., Mancera-Taboada, J., Rodríguez-González, P., Hernández-López, D., Felipe-García, B., Gozalo-Sans, I & Arias-Perez, B. (2012). 3D

Modelling and Accuracy Assessment of Granite Quarry Using Unmanned Aerial Vehicle. *Isprs Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 1. 37–42. doi:10.5194/isprsannals-I-3-37-2012.

Gunen, M. A., Taskanat, T., Atasever, O., & Besdok, E. (2019). Usage of Unmanned Aerial Vehicles (Uavs) in Determining Drainage Networks. *E-journal of New World Sciences Academy*, 14(1). doi: 10.12739/NWSA.2019.14.1.4A0062

Haas, F., Hilger, L., Neugirg, F., Umstädter, K., Breitung, C., Fischer, P., Hilger, P., Heckmann, T., Dusik, J., Kaiser, A., Schmidt, J., Seta, M., Rosenkranz, R. & Becht, M. (2015) Quantification and analysis of geomorphic processes on a recultivated iron ore mine on the Italian island Elba using long-time ground-based LIDAR and photogrammetric data by an UAV. *Nat Hazard Earth Sys* 3(10). 6271–6319. doi:10.5194/nhessd-3-6271-2015

Harwin, S. & Lucieer, A. (2012). Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sensing*. 4. 1573-1599. doi: 10.3390/rs4061573.

HORUS. (2020). Aerofotogrametria com Drones - Conceitos Básicos. Consultado em 2020, Agosto 2 em <https://www.slideshare.net/MarcosMartins98/horus-aerofotogrametria-com-drones>

Hu, Z., Ren, E., Xiao, W., & Zhao, Y. (2019). Int J Coal Sci Technol 6. A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives. *International Journal of Coal Science & Technology*. 6. 320-333. doi: 10.1007/s40789-019-00264-5

Hunt, D. (2017). World War 1 History: The Kettering Bug—World's First Drone. Consultado em 2020, Setembro 3 em <https://owlcation.com/humanities/World-War-1-History-The-Kettering-Bug-Worlds-First-Flying-Bomb>

Javadnejad, F., Slocum, R., Gillins, D., Olsen, M. & Parrish, C. (2021). Dense Point Cloud Quality Factor as Proxy for Accuracy Assessment of Image-Based 3D Reconstruction. *Journal of Surveying Engineering*. 147. 04020021-1. doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000333

Júnior, P., Silva, M., Silveira, F. & Veit, E. (2013). Laboratório de mecânica. Subsídios para o ensino de Física experimental. Porto Alegre. UFRGS, Instituto de Física. http://www.if.ufrgs.br/cref/labmecanica/Lima_Jr_et_al_2013.pdf

Júnior, S. R. (2011). Determinação de volumes em atividades de mineração utilizando ferramentas do sensoriamento remoto (Tese de doutoramento em Engenharia Civil para obtenção do título de Doctor Scientiae, Universidade Federal de Viçosa, Brasil). Obtido de <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/827/1/texto%20completo.pdf>

Kerr, A., Rafuse, H., Sparkes, G., Hinchey, J. & Sandeman, H. (2011). Visible/infrared spectroscopy (VIRS) as a research tool in economic geology; background and pilot studies from New Foundland and Labrador. 145-166. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/288899855_Visibleinfrared_spectroscopy_VIRS_as_a_research_tool_in_economic_geology_background_and_pilot_studies_from_New_Foundland_and_Labrador

Krzystek, P. & Stuttgart. (1991). FULLY AUTOMATIC MEASUREMENT OF DIGITAL ELEVATION MODELS WITH MATCH-T. (Conferência: 43rd Photogrammetric Week). Disponível em https://www.researchgate.net/publication/325113545_FULLY_AUTOMATIC_MEASUREMENT_OF_DIGITAL_ELEVATION_MODELS_WITH_MATCH-T

Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2):91–110. Zitiert auf Seite 46.

Louhaichi, M., Borman, M. & Johnson, D. (2001). Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. *Geocarto International*. 16. doi: 10.1080/10106040108542184.

- Mantero, E. B. (2020). ¿Cuáles son las partes de un dron? Consultado em 2020, Dezembro 2 em <https://dronprofesional.com/blog/cuales-son-las-partes-de-un-dron/>
- Martin, P.G., Payton, O.D., Fardoulis, J.S., Richards, D.A. & Scott, T.B. (2015). The use of unmanned aerial systems for the mapping of legacy uranium mines. *Journal of Environmental Radioactivity*. 143. 135–140. doi: 10.1016/j.jenvrad.2015.02.004.
- McGlone, J.; Mikhail, E., Bethel, J. & Mullen, R. (2004). *Manual of photogrammetry*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Metcalfe, P. J. (2013). *Evaluation of Remotely Piloted Aircraft in Surveying Application*. (Dissertação para obtenção do grau de Bachelor of Spatial Science, Faculty of Health, Engineering & Sciences, University of Southern). Disponível em https://eprints.usq.edu.au/24628/1/Metcalfe_2013.pdf
- Micheletti, N., Chandler, J.H. & lane, S.N. (2015). Structure from motion (SfM) photogrammetry. *Geomorphological Techniques*. London: British Society for Geomorphology, London. (pp. 2047-0371). Disponível em: https://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/geom_tech_chapters/2.2.2_sfm.pdf
- Nagendran, S. K., & Ismail, M. A. (2020). Application of UAV photogrammetry for quarry monitoring. *Warta Geologi*. 46(2). doi:10.7186/wg462202006
- PDX. (2020). *Vegetation Indices-Enhancing green vegetation*. Consultado em 2020, Dezembro 1 em http://web.pdx.edu/~nauna/resources/8-2012_lecture1-vegetationindices.pdf
- Pix4DMapper (2017). *Pix4DMapper 4.1. – User Manual*. Consultado em 2020, Setembro 2 em <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offline-Getting-Started-and-Manual-pdf>
- Regulamento n.º 1093/2016, 14 de dezembro de 2016, Diário da República.
- Pucino, N. (2015). *Help From The Sky: The UAVs Contribution to Climate Change Mitigation in the Pacific Island Countries - A new affordable digital photogrammetric method*. Universidade de Wollongong: Spring.
- Raeva, P. L., Filipova, S. L., & Filipov, D. G. (2016). Volume computation of a stockpile - A study case comparing GPS and uav measurements in an open pit quarry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 2016-January*. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B1-999-2016
- ReNEP. (n.d.). Consultado em 2021, Junho 13 em <https://renep.dgterritorio.gov.pt/>
- Rhodes, R. K. (2017). *UAS as an Inventory Tool: A Photogrammetric Approach to Volume Estimation* (Dissertação de mestrado em Science in Geography, University of Arkansas) Disponível em <https://scholarworks.uark.edu/etd/2424>
- Rodrigues, C. (2016) *Extração de Fachadas de Edifícios em Imagens Obtidas com UAV* (Dissertação de mestrado em Engenharia Geográfica, Universidade de Lisboa, Portugal). Disponível em ulfc121222_tm_Carolina_Rodrigues.pdf
- Rossi, P., Mancini, F., Dubbini, M., Mazzone, F. & Capra, A. (2017). Combining nadir and oblique UAV imagery to reconstruct quarry topography: Methodology and feasibility analysis. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 211–221. doi: 10.1080/22797254.2017.1313097
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite–1 Symposium*. 1. 309-317. Disponível em SNWA_Exh_586_Rouse_1974.pdf (nv.gov)
- Ruotsala, A. (2016). *Digital Close-Range Photogrammetry – A Modern Method to Document Forensic Mass Graves*. Doi: 10.13140/RG.2.1.1668.7603

- Rumpler, M., Tscharf, A., Mostegel, C., Daftry, S., Hoppe, C., Pretenthaler, R., Fraundorfer, F., Mayer, G. & Bischof, H. (2017) Evaluations on multi-scale camera networks for precise and geo-accurate reconstructions from aerial and terrestrial images with user guidance. *Computer Vision and Image Understanding*, 157, 255-273. doi: 10.1016/j.cviu.2016.04.008
- Salvini, R., Mastrorocco, G., Esposito, G., Di Bartolo, S., Coggan, J., & Vanneschi, C. (2018). Use of a remotely piloted aircraft system for hazard assessment in a rocky mining area (Lucca, Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1). 1-35. doi: 10.5194/nhess-18-287-2018
- Salvini, R., Mastrorocco, G., Seddaiu, M., Rossi, D., & Vanneschi, C. (2017). The use of an unmanned aerial vehicle for fracture mapping within a marble quarry (Carrara, Italy): photogrammetry and discrete fracture network modelling. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(1). doi: 10.1080/19475705.2016.1199053
- Santos, R. (2010). *Elementos de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto*. Paraná, Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica. Disponível em <https://pt.slideshare.net/danielsantosufpr/fs-cap-ia5>
- Saque, P. F. (2017). *Levantamento Fotoaéreo via drone: Estudo de caso na pedreira São Jorge* (Dissertação para obtenção do grau de Bacharel em Geologia, Universidade Federal Do Paraná, Curitiba). Disponível em http://www.geologia.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2019/06/TCC_Pamela_Ferreira_Saque.pdf
- Sayab, M., Aerden, D., Paananen, M., & Saarela, P. (2018). Virtual structural analysis of Jokisivu open pit using «structure-from-motion» Unmanned Aerial Vehicles (UAV) photogrammetry: Implications for structurally-controlled gold deposits in Southwest Finland. *Remote Sensing*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/rs10081296>
- Silva, A. N., Lira, C., Taborda, R., Dias, E., Catalão, J. & Amorim, A. (2016). *Sistemas de Informação Geográfica: Análise Espacial*. DGRM, Lisboa, Portugal. Disponível em www.sophia-mar.pt
- Skyphoto (s.d.) *Regulamentação Drones*. Consultado em 2021, Maio 18 em http://www.skyphoto.pt/Regras/Regulamentacao_Drones.html
- Szeliski, R. (2010). *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Disponível em https://szeliski.org/Book/drafts/SzeliskiBook_20100903_draft.pdf
- Thecasefarm. (s.d.) *A History of Drones: From then until now - The Case Farm*. Consultado em 2021, Outubro 5 em <https://www.thecasefarm.co.uk/a-history-of-drones/>
- Tommaselli, A. M. (2009). *Fotogrametria Básica- Introdução*. Disponível em http://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/891/introducao_a_fotogrametria.pdf
- Tucker, C.J., (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8, 127–150, doi:10.1016/0034-4257(79) 90,013-0
- Vasconcelos, S. L., Souza, J. C., Rocha, S. S., Rodrigues, H. C., Maris, J. L., & Silva, R. F. (2018). Determinação de volumes e áreas em mineração a céu aberto utilizando drones. 9º Congresso Brasileiro de Minas a Céu Aberto e Minas Subterrâneas. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/337951370>
- Vyas, K. (2018). *A Brief History of Drones: The Remote Controlled Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)*. Consultado em 2020, Junho 4 em <https://interestingengineering.com/a-brief-history-of-drones-the-remote-controlled-unmanned-aerial-vehicles-uavs>
- WIKIPEDIA. (s.d.) *Veículo aéreo não tripulado*. Consultado em 2020, Maio 5 em https://pt.wikipedia.org/wiki/Ve%C3%ADculo_a%C3%A9reo_n%C3%A3o_tripulado

Wilson, A. (s.d.) WIKIMEDIA COMMONS Consultado em 2020, Maio 10 em [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fcommons.wikimedia.org%2Fwiki%2FFile%3ARadioplane_OQ-2_\(26150867906\).jpg&psig=AOvVaw0XN5IaAjoarpsEPDiH1H3O&ust=1584382531709000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCOCvg4SLnegCFQAAAAAdAAAAABAD](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fcommons.wikimedia.org%2Fwiki%2FFile%3ARadioplane_OQ-2_(26150867906).jpg&psig=AOvVaw0XN5IaAjoarpsEPDiH1H3O&ust=1584382531709000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCOCvg4SLnegCFQAAAAAdAAAAABAD)

Wolf, P. R., Dewitt, B. A. (2000). Elements of Photogrammetry with Application in GIS. Journal of Chemical Information and Modeling (3ª ed.). 110