



**SIG e Geomática no apoio à
gestão de minas a céu aberto
Caso de estudo: Mina C-57 ,
Gonçalo (Guarda)**

Versão final após defesa

Andreia Barata Santos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Sistemas de Informação Geográfica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Gabriel de Faria Lapa Barbosa de Almeida
Co-orientadora: Mestre Maria Alexandra Leal Carolino

janeiro 2022

Folha em branco

Agradecimentos

Ao meu orientador e professor, Pedro Almeida, (e colega geólogo pela mesma faculdade que eu, como o Mundo é pequeno!), obrigada por me aceitar como sua orientanda, pela confiança e apoio que demonstrou desde início, pela liberdade que me deu na escolha do tema desta tese, por acreditar e ajudar a desenvolver uma ideia mesmo quando esta ainda era muito robusta. Grata também pelas horas infindáveis em que me aturou, pela paciência, partilha de conhecimento e boa disposição.

À minha co-orientadora, a geóloga Alexandra Carolino, muito obrigada pela oportunidade única que me concedeu! Obrigada por me abrir as portas da sua mina e permitir ter um gostinho, ainda que ligeiro, da minha querida geologia nesta tese. Obrigada, igualmente, pela sua amabilidade, simpatia, partilha, disponibilidade e claro, por me encher a mochila cheia de belas amostras!

À minha mamie, Maria Amorosa, que me apoiou e apoia incondicionalmente, sem ela não teria alcançado o que alcancei até hoje e por isso um eterno e insuficiente obrigada.

Um obrigada à minha mãe Adélia e às minhas irmãs Sara e Marisa, que mesmo longe, são a força e a razão de querer alcançar todos os dias algo melhor.

À Maria José, por me ter dado a mão em momentos difíceis, pelo seu apoio e por me ajudar a conquistar este dia, sou-lhe eternamente grata.

Ao João Bernardo, que sempre teve mais fé e confiança nas minhas capacidades que eu mesma, que me ouviu, sempre com a mesma paciência, horas a fio a procrastinar e que nunca me deixou, em momento algum, desistir e sempre acreditou em mim, muito obrigada por tudo.

À Pollyanna, pelos longos áudios partilhados de desabafos e desesperos e pelo incentivo e força incrível que me foi dando, obrigada.

Um obrigada a todos os meus colegas e amigos, em especial à minha melhor amiga de longa data, a Cláudia Santos, que me apoia todos os dias e tem sempre uma palavra de ânimo e reconforto para me dar.

À excelente psicóloga e pessoa, Ana Isabel, chave de apoio crucial nesta última etapa, o meu muito obrigada.

E por último, mas importante, um bem-haja a todos os meus professores que ao longo da minha vida me deram as ferramentas e bases necessárias para estar aqui hoje.

Folha em branco

Resumo

A atividade mineira é uma das atividades mais antigas e importantes da humanidade, sendo uma atividade que se encontra intimamente interligada ao avanço e evolução da tecnologia.

A crescente procura de matérias-primas, principalmente de metais, envolve inevitavelmente a pesquisa e prospeção dos mesmos e conseqüente abertura de pedreiras e minas. A par com este crescimento está a preocupação cada vez maior dos impactos inerentes à abertura e funcionamento de minas e pedreiras. Sem soluções eficazes e permanentes que permitam o fim da exploração mineira, a prioridade é garantir que esta seja efetuada de forma segura, com uma gestão sustentável e com a redução, o mais possível, dos efeitos negativos inerentes.

Existem principalmente muitas pequenas ou médias empresas mineiras, que com capital mais reduzido, possuem uma gestão mineira menos eficiente e sustentável.

Com o desenvolvimento de uma metodologia baseada na integração de técnicas de geomática, como a deteção remota com recurso a veículos aéreos não tripulados e processamentos fotogramétricos, com os Sistemas de Informação Geográfica e com a aplicação da mesma num caso de estudo na Mina C-57 “Castanho” (Gonçalo, Portugal), foi possível demonstrar que uma pequena ou média empresa mineira a céu aberto pode ter ao seu dispor, de forma fácil e de relativo baixo custo, ferramentas poderosas que permitem obter um conjunto de bases de dados continuamente atualizados, aumentar a eficácia de todas as etapas e operações inerentes à mina e, de uma forma muito importante, contribuir para uma exploração mineira mais segura e sustentável com a redução de riscos intrínsecos à própria atividade mineira.

Palavras-chave

Geomática; SIG; Deteção Remota; Drones; Exploração mineira; Gestão Mineira Sustentável.

Folha em branco

Abstract

The mining activity is one of the oldest and most important activities of humanity and is an activity, which It's connected with the advancement and evolution of technology.

The growing demand for raw materials, mainly of metals, inevitably involves researching and prospecting them and the consequent opening of quarries and mines. Along with this increase, there is a growing concern about the impacts inherent to the opening and operation of mines and quarries.

Without effective and permanent solutions that allow the end of mining, the priority is to ensure that It's done in a safe way, with a sustainable management and with the reduction, as much as possible, of the inherent negative effects.

There are mainly many, small and medium-sized mining companies, which with smaller capital, have less efficient and sustainable mining management.

With the development of a methodology, based on the integration of geomatics techniques, such as remote sensing using unmanned aerial vehicle and photogrammetric processing, with Geographic Information Systems and with the application of the methodology in a case study at Mine C-57 "Castanho" (Gonçalo, Portugal), it was possible to demonstrate, that a small or medium-sized company open pit mining can have access, easily and relatively low cost, powerful tools that allow to obtain a set of continuously updated databases, increase the effectiveness of all stages and operations inherent to the mine and, most important, contribute to safer and more sustainable mining with the reduction of risks intrinsic to the mining activity itself.

Keywords

Geomatics; GIS; Remote Sensing; Drones; Mining; Sustainable Mining Management.

Folha em branco

Índice

Agradecimentos.....	3
Resumo	5
Abstract.....	7
Lista de Figuras	11
Lista de Gráficos.....	15
Lista de Tabelas.....	17
Lista de Acrónimos.....	19
1 Introdução	1
2 Estado de arte.....	4
2.1 Ciências de Informação Geográfica e Sistemas de Informação Geográfica	4
2.2 Geomática.....	11
2.3 Detecção remota	12
2.4 Fotogrametria	22
2.4.1 Fotografia aérea.....	24
2.5 Veículos aéreos não tripulados.....	26
2.6 Indústria mineira e a utilização dos SIG e Detecção Remota	31
2.6.1 Os drones e a indústria mineira	34
3 Metodologia.....	40
4 Caso de estudo.....	46
4.1 Enquadramento da Mina C-57.....	47
4.1.1 Enquadramento geográfico	48
4.1.2 Enquadramento geológico	49
4.1.3 Enquadramento histórico da exploração mineira no Vale da Gaia.....	55
4.2 Trabalho de campo.....	57
4.3 Resultados e análises	60
4.3.1 Tratamento dos dados.....	60
4.3.2 Determinação de volumes.....	66
4.3.3 Mapa de declives.....	70
4.3.4 Mapas de visibilidade.....	71
4.3.5 Outros produtos cartográficos.....	72
5 Conclusões.....	76
6 Bibliografia	78

Folha em branco

Lista de Figuras

Figura 1.1: Evolução da humanidade vs. materiais (Adaptado de Chrystianne, 2011).....	1
Figura 2.1: Conceito de um Sistema de Informação Geográfica (Adaptado de Konecny, 2014)	5
Figura 2.2: Componentes do <i>Hardware</i> (Adaptado de Konecny, 2014).....	6
Figura 2.3: Modelos de dados: vetorial e matricial (Adaptado de Chang, 2019).....	8
Figura 2.4: Evolução dos custos dos diferentes componentes do SIG (Adaptado de Konecny, 2014)	10
Figura 2.5: Componentes do processo de detecção remota (Adaptado de Konecny, 2014) ...	14
Figura 2.6: Sensor passivo (Adaptado de NRC, 2019).....	14
Figura 2.7: Espectro eletromagnético (Adaptado de NASA´s Imagine the Universe, 2013)	15
Figura 2.8: Sensor ativo (Adaptado de NRC, 2019).....	15
Figura 2.9: Tipos de plataformas (Adaptado de Gomasca, 2009).....	16
Figura 2.10: Resolução espacial (A- IFOV, B- área visualizada, C-distância entre o solo e o sensor) (NRC, 2019).....	17
Figura 2.11: Filme preto e branco vs. Filme colorido (NRC, 2019)	17
Figura 2.12: Resolução radiométrica: a) 1 bit b) 2 bits c) 4 bits d) 8 bits (Adaptado de Liang et al., 2012)	18
Figura 2.13: Resolução temporal: diferenças na vegetação - (a) verão (b) primavera (Adaptado de Lillesand et al., 2015).....	19
Figura 2.14: Tipos de interação radiação vs. alvo (A-Absorvido, R-Refletido, T-Transmitido, I-Energia incidente) (NRC, 2019)	20
Figura 2.15: Reflexão especular vs. difusa (Adaptado de SEOS, 2021).....	20
Figura 2.16: Resposta espectral para diferentes tipos de alvos (Adaptado de Gomasca, 2009).....	21
Figura 2.17: Par e o modelo estereoscópico (Casaca et al., 2005)	23
Figura 2.18: Elementos da câmara fotográfica (Adaptado de Inglesias, 2015).....	24
Figura 2.19: Orientação da câmara para os diferentes tipos de fotografia aérea (vertical e oblíquo) (Adaptado de Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014)	25
Figura 2.20: Tipos de drones (1) Multi-rotor (2) Asa fixa (3) Rotor único (4) Híbrido asa fixa VTOL (Adaptado de Tkáč & Mésároš, 2019)	28
Figura 2.21: Componentes de um drone (ex. drone multi-rotor) (Adaptado de Grind Drone, 2021)	29
Figura 2.22: Aplicações dos drones (Adaptado de Hassanalian & Abdelkefi, 2017).....	30
Figura 2.23: Refletância espectral de alguns minerais e vegetação (Adaptado de Davids & Rouyet, 2018)	32

Figura 2.24: Levantamento com drone (Adaptado de Wingtra, 2021)	35
Figura 2.25: Levantamento tradicional GNSS (Adaptado de Wingtra, 2021)	35
Figura 2.26: Fases da exploração mineira (Adaptado de Diário da República, 2012)	36
Figura 2.27: Percentagem da utilização dos drones e principais aplicabilidades para cada fase do processo de exploração mineira, com base em bibliografia revistada por Park & Choi (2020)(Adaptado de Park & Choi, 2020)	37
Figura 3.1: Metodologia proposta para um fluxo de trabalho no apoio à gestão mineira a céu aberto	41
Figura 4.1: Etapas do caso de estudo	46
Figura 4.2: Entrada da Mina C-57 “Castanho”, Gonçalo (Guarda)	47
Figura 4.3: Enquadramento geográfico da Mina C-57.....	48
Figura 4.4: Esquema geológico simplificado do Batólito das Beiras (Azevedo & Aguado, 2013)	50
Figura 4.5: Enquadramento geológico da região de Gonçalo e Concessões Mineiras	52
Figura 4.6: Mapa geológico das soleiras estaníferas e litiníferas de Seixo Amarelo-Gonçalo (Ramos, 2007).....	54
Figura 4.7: Aldeia de Gonçalo e Vale da Gaia, vista de W-E (Foto Prof. Dr. Pedro Almeida)	55
Figura 4.8: Draga no Vale da Gaia nos anos 70 (José Leal da Costa in Silva, 2016).....	56
Figura 4.9: Drone DJI Mavic Pro 2	57
Figura 4.10: Levantamentos com drone e localizações da câmara e número de densidade de imagens.....	59
Figura 4.11: Frentes da mina, vista de SE para NW (Imagem: Pedro Almeida).....	59
Figura 4.12: Perspetiva geral da Mina C-57, vista E para W (Fotograma de vídeo: Pedro Almeida)	60
Figura 4.13: 1ª etapa do processamento: Alinhamento das fotos	61
Figura 4.14: 2ª etapa do processamento: Geração da nuvem de pontos densa.....	61
Figura 4.15: Geração de Modelo 3D - <i>Mesh</i> (Tipo de visualização: <i>Model Shaded</i> (a), <i>Model Solid</i> (b), <i>Model Wireframe</i> (c))	62
Figura 4.16: Modelos 3D - <i>Mesh</i> (a) vs. <i>Tiled Model</i> (b)	62
Figura 4.17: Modelo Digital de Elevação (com vegetação).....	63
Figura 4.18: Classificação automática da nuvem de pontos em classes vegetação e solo	63
Figura 4.19: Classificação manual dos edifícios e viatura.....	64
Figura 4.20: Modelo Digital de Terreno	64
Figura 4.21: Linhas de contorno.....	65
Figura 4.22: Ortomosaico	65

Figura 4.23: Cálculo de volume I - Recorte da zona da nuvem para isolamento do stock (1., 2.), geração da <i>mesh</i> (3) e fecho da malha para cálculo de volume (4.).....	67
Figura 4.24: Cálculo de volume II- Recorte da zona da nuvem para isolamento do stock (1., 2.), geração da <i>mesh</i> (3) e fecho da malha para cálculo de volume (4.).....	68
Figura 4.25: Evolução do aspeto do modelo 3D com redução do número de faces.....	69
Figura 4.26: Mapa de declives	70
Figura 4.27: Mapa de visibilidade a partir das habitações.....	71
Figura 4.28: Mapa de visibilidade a partir das estradas	72
Figura 4.29: Mapa curvas de nível (equidistância 1 m) sobreposto ao ortomosaico.....	73
Figura 4.30: Planta topográfica com sobreposição de ortomosaico.....	74
Figura 4.31: Carta de ocupação de solo simplificada.....	74

Folha em branco

Lista de Gráficos

Gráfico 4.1: Influência da redução do número de faces no cálculo do volume e área..... 69

Folha em branco

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Vantagens e desvantagens modelo vetorial vs. matricial (Adaptado de Reddy, 2008).....	9
Tabela 4.1: Características do drone DJI Mavic Pro 2 (Adaptado de DJI, 2021)	58
Tabela 4.2: Duração, altitude e n° de fotos para cada levantamento	58
Tabela 4.3: Duração e parâmetros para os diversos processamentos.....	66
Tabela 4.4: Número de faces vs. volume e área para o stock 2.....	68

Folha em branco

Lista de Acrónimos

CIG	Ciências de Informação Geográfica <i>Canada Geographical Information System</i>
CGIS	(Sistema de Informação Geográfica do Canadá)
CPU	<i>Central Processing Unit</i> (Unidade de processamento central)
DEM	<i>Digital Elevation Model</i> (Modelo Digital de Elevação)
ERAST	<i>Environmental Research Aircraft and Sensor Technology</i> (Aeronaves de Pesquisa Ambiental e Tecnologia de Sensor)
G.C.	<i>Government of Canada</i> (Governo do Canadá)
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> (Sistema Global de Navegação por Satélite)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
HALE	<i>Height Altitude, Long Endurance</i> (Alta altitude, Longa Duração)
HLCG	<i>Harvard Laboratory for Computer Graphics</i> (Laboratório de Harvard para computação gráfica)
IA	Inteligência Artificial
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i> (Campo de Visão Instantâneo)
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> (Unidade de Medida Inercial)
InSAR	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i> (Radar Interferométrico de Abertura Sintética)
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
LALE	<i>Low Altitude, Long Endurance</i> (Baixa Altitude, Longa Duração)
LASE	<i>Low Altitude, Short-Endurance</i> (Baixa Altitude, Curta Duração)
LCPA	<i>Least Cost Path Analysis</i>

	(Análise da Rota de Menor Custo)
LiDAR	<i>Light Detection and Radar</i> (Deteção de Luz e Radar)
MALE	<i>Medium Altitude, Long Endurance</i> (Média Altitude, Longa Duração)
MAV	<i>Micro Air Vehicles</i> (Micro Veículos Aéreos)
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
ML	<i>Machine Learning</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Aeronáutica Nacional e Administração Espacial)
NAV	<i>Nano Air Vehicles</i> (Nano Veículos Aéreos)
NIR	<i>Near Infrared</i> (Infravermelho próximo)
NRC	<i>Natural Resources Canada</i> (Recursos Naturais do Canadá)
ONR	<i>Office of Naval Research</i> (Gabinete de Pesquisa Naval)
PATC	<i>The Portuguese American Tin Company</i>
RA	Realidade Aumentada
RAM	<i>Random Access Memory</i> (Memória de acesso aleatório)
REE	<i>Rare Earth Elements</i> (Elementos de Terras Raras)
RV	Realidade Virtual
SANT	Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i> (Radar de Abertura Sintética)
SEOS	<i>Science Education through Earth Observation for High Schools</i> (Educação científica por meio da observação da Terra para o ensino secundário)
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SONAR	<i>Sound Navigation and Ranging</i> (Navegação e Alcance Sonoro)

SSIUSC	<i>Spatial Sciences Institute, University of Southern California</i> (Instituto de Ciências Espaciais, Universidade do Sul da Califórnia)
SWIR	<i>Short-Wave Infrared</i> (Infravermelho de onda curta)
SYMAP	<i>Synagraphic Mapping System</i> (Sistema de Mapeamento <i>Synagraphic</i>)
UBI	Universidade da Beira Interior
VANT	Veículos Aéreos Não Tripulados
VNIR	<i>Visible-Near Infrared</i> (Visível e Infravermelho próximo)
VTOL	<i>Vertical Take-Off & Landing</i> (Decolagem e Aterragem Vertical)
ZCI	Zona Centro Ibérica

Folha em branco

1 Introdução

A exploração mineira é uma das mais importantes atividades que acompanha a humanidade desde a pré-história até à atualidade, sendo uma grande propulsora da evolução da mesma até aos dias de hoje (Figura 1.1).

A utilização de rochas e minerais metálicos foi tão importante na pré-história que esta foi dividida em três grandes períodos históricos consoante o tipo de material utilizado: a Idade da Pedra, a Idade do Bronze e a Idade do Ferro, havendo ainda autores que consideram a Idade da Argila, que é sucedida pela Idade do Cobre que assinala a transição da Idade da Pedra para a Idade do Bronze (Navarro, 2006).



Figura 1.1: Evolução da humanidade vs. materiais (Adaptado de Chrystianne, 2011)

Praticamente tudo o que nos envolve e que usufruímos no nosso dia a dia é constituído por matérias-primas, nomeadamente rochas e minerais metálicos e não metálicos, que carecem de um processo longo de pesquisa, exploração e/ou transformação.

O pavimento que pisamos, as paredes e telhados dos edifícios, as loiças e bancadas das nossas casas, todos os, cada vez mais imprescindíveis, aparelhos eletrónicos, veículos, até os cosméticos e medicamentos são apenas uma pequena fração de todos os produtos que utilizam rochas e minerais quer seja na forma bruta ou transformada.

As crescentes preocupações ambientais a nível global quanto ao uso de combustíveis fósseis e redução da pegada de carbono resultaram na procura de alternativas ditas mais sustentáveis e amigas do ambiente, nomeadamente as energias renováveis e a aposta na energia elétrica. Mas nem estas energias estão “livres” de necessitarem de matérias-primas,

e quanto maior a implementação destas energias maior também a procura por estes materiais.

A crescente procura de matérias-primas, principalmente de metais, envolve inevitavelmente a pesquisa e prospeção dos mesmos e consequente abertura de pedreiras e minas a céu aberto para serem exploradas.

Mais uma vez as questões ambientais são um problema intrínseco e motivo de discórdia e conflito aquando da abertura e funcionamento de uma mina ou pedreira. No entanto, até aos dias de hoje e pelo menos por um longo período de tempo no futuro, não existem respostas que permitam a cessão da prospeção e exploração das matérias-primas.

Existem, claro, já ideias que tentam atenuar a exploração massiva, algumas mais imediatas como avanço de uma economia circular com a reciclagem e reutilização das matérias-primas ou outras ideias mais futurísticas como a exploração mineira espacial. Mesmo assim, ainda não existem respostas capazes de atender às necessidades atuais, em que a procura é maior que a resposta.

Portanto, uma vez que a solução não é a estagnação e retrocesso da evolução, principalmente tecnológica, e com a falta de soluções eficazes e permanentes que permitam o fim da exploração mineira (pelo menos na Terra), a prioridade é garantir que a inevitável exploração mineira seja efetuada de forma segura, com uma gestão sustentável e com a redução, o mais possível, dos efeitos negativos inerentes.

De uma forma geral, existe a perceção que muitas pequenas ou médias empresas mineiras, com capital mais reduzido, possuem uma gestão mineira menos eficiente e sustentável. São empresas em geral com maior défice na recolha de informações, apresentando um menor conjunto de dados e análises que são atualizados por períodos de tempo mais longos, principalmente devido aos custos na contratação de profissionais específicos.

Pretende-se com esta dissertação desenvolver uma metodologia adaptada a uma pequena ou média empresa mineira a céu aberto, que mostre que é possível, mesmo uma pequena ou média empresa, com um investimento relativamente acessível, melhorar de forma substancial toda a gestão mineira, tornando-a não só mais eficiente e sustentável com a redução de riscos associados como também permitir reduzir custos a longo prazo e a obter de forma mais regular dados atualizados e sempre que necessário, metodologia essa, baseada na integração de técnicas de geomática, como a deteção remota com recurso a drone e processamentos fotogramétricos, com os Sistemas de Informação Geográfica.

A estrutura da dissertação divide-se em três capítulos principais.

O capítulo respeitante ao “Estado de arte” teve como objetivo uma revisão bibliográfica com pesquisa dos principais temas e conceitos relevantes para aplicação do caso de estudo.

No capítulo da “Metodologia” é abordada e proposta, tal como o nome indica, uma metodologia ou fluxo de trabalho que se considera vantajosa quando aplicada a uma gestão mineira a céu aberto de uma pequena e média empresa.

Por último, o capítulo referente ao “Caso de estudo” teve como objetivo aplicar parte da metodologia e estudar a eficácia da mesma.

2 Estado de arte

2.1 Ciências de Informação Geográfica e Sistemas de Informação Geográfica

A Ciência da Informação Geográfica (CIG) abrange o conjunto dos domínios do conhecimento envolvidos na produção e na utilização de informação geográfica (Matos, 2008), ou seja, segundo Longley, Goodchild, Maguire & Rhind (2015), CIG é uma área que envolve o estudo dos conceitos, princípios e métodos que são colocados em prática com recurso a técnicas e ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), incentivando os utilizadores a compreender os benefícios das tecnologias SIG em fornecer um conjunto poderoso de ferramentas de análise e como parte de uma disciplina mais ampla que promove o pensamento geográfico e estratégias de resolução de problemas que sejam úteis para a sociedade (Wing & Bettinger, 2008).

Matos (2008) destaca que a área dos CIG apenas recentemente foi tida como um domínio científico autónomo, e não apenas uma junção ocasional de outras áreas de conhecimento, compreendendo a sua componente principal matérias de cartografia, posicionamento, sistemas de informação e computação gráfica.

A história do desenvolvimento dos SIG gera alguma controvérsia principalmente devido ao fato da evolução ter ocorrido em paralelo na América do Norte, Europa e Austrália mas, considera-se que o impulsionador dos SIG tenha sido o CGIS (Sistema de Informação Geográfica do Canadá) na década de 60, tendo também o HLCG (Laboratório de Harvard para Computação Gráfica), tido um papel relevante na medida em que foram desenvolvidos os programas SYMAP (Sistema de Mapeamento *Synagraphic*), precursor dos sistemas *raster* e posteriormente o ODISSEY, precursor dos sistemas vetoriais, contudo dois fatos eram evidentes no início do desenvolvimento dos SIG, primeiro, existiam poucos dados geográficos e espaciais para trabalhar, segundo, a tecnologia de armazenamento e manipulação de dados era muito rudimentar comparando com a atual (Longley et al., 2015; Matos, 2008; Wing & Bettinger, 2008).

Embora os SIG, como componente digital, esteja disponível apenas há relativamente pouco tempo, a utilização de cartografia e de sobreposição de informação geográfica e análise espacial já remonta de há centenas de anos. Por exemplo, em 1854, John Snow conduziu em Londres uma análise espacial comparando as localizações de mortes por cólera com locais de poços, resultando que fosse descoberto que a água de poços específicos era um meio de propagação da infeção de cólera, outro exemplo, é o caso do cartógrafo francês

Louis-Alexandre Berthier que durante a revolução americana sobrepôs diversos mapas de modo a analisar os movimentos das tropas, no Egito, por exemplo, existem dados espaciais, que remontam ao ano de 1400 A.C., coletados com o objetivo de realizar registros de levantamentos de propriedades para fim de tributação (Wing & Bettinger, 2008).

O conceito de SIG (Figura 2.1) tem variado ao longo do tempo e consoante os diferentes autores mas, pode ser definido atualmente, em termos gerais, como um sistema de base de dados computadorizado para a recolha, armazenamento, recuperação, pesquisa, visualização, análise e disponibilização de dados espaciais em formato digital sendo, os dados espaciais, o produto inicial para a constituição de informação geográfica definida por um conjunto de coordenadas que a localiza num determinado espaço (Cosme, 2012; Reddy, 2008).

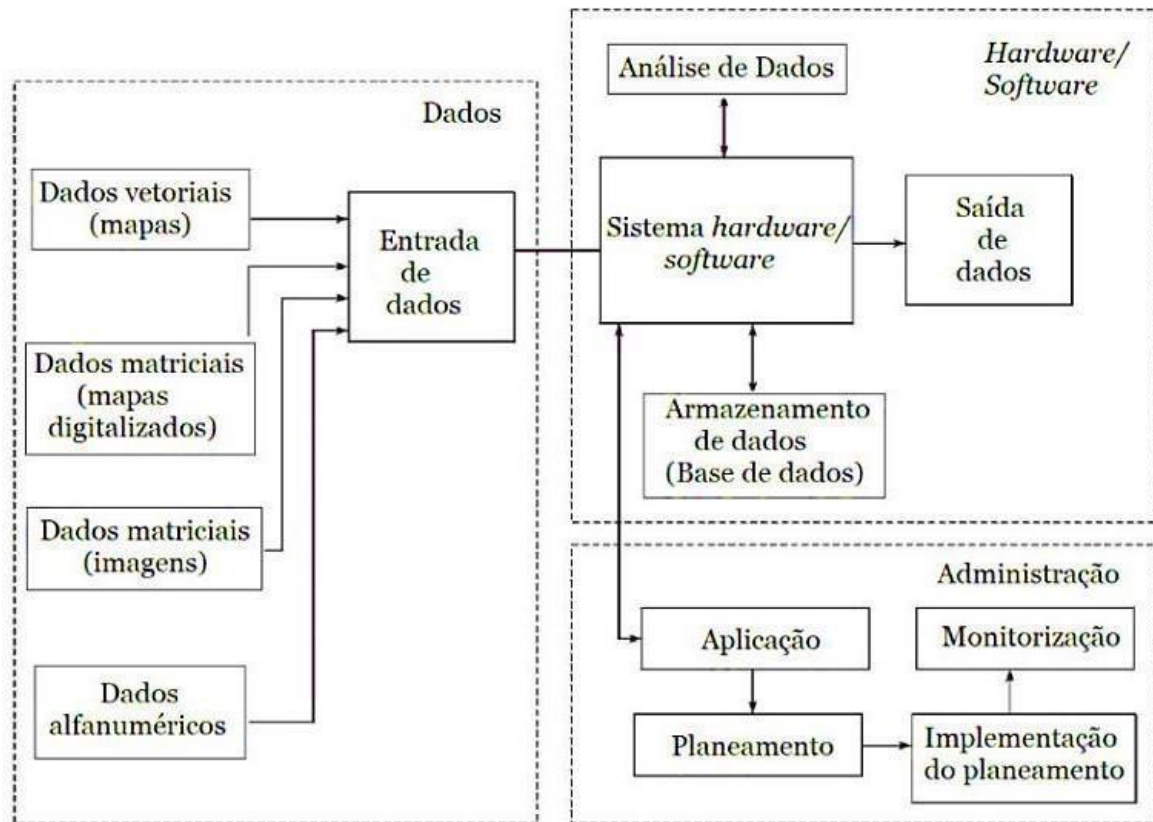


Figura 2.1: Conceito de um Sistema de Informação Geográfica (Adaptado de Konecny, 2014)

Segundo Reddy (2008), um SIG é constituído por três importantes componentes que funcionam em equilíbrio de modo que o sistema funcione corretamente:

- (a) *Hardware*;
- (b) Conjunto de aplicações de módulos de *software*;
- (c) Uma configuração organizacional adequada.

Por sua vez, Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind (2005) dividiram os componentes do SIG em seis categorias:

- | | |
|------------------------------|----------------------------|
| (1) Rede (<i>network</i>); | (4) Dados (<i>data</i>); |
| (2) <i>Software</i> ; | (5) Procedimentos; |
| (3) <i>Hardware</i> ; | (6) Indivíduos. |

O *hardware* é um dispositivo com o qual o utilizador interage diretamente na realização de operações SIG e que tem como funções o processamento, armazenamento, entrada e saída de dados sendo constituído por três componentes principais (Figura 2.2) (Chang, 2019; Konecny, 2014; Longley et al., 2005):

- (a) Dispositivo de entrada (depende do tipo de dados a ser utilizado e pode consistir em scanners, sistemas digitais aerotransportados e espaciais com sensores acoplados, sistemas de mapeamento móvel, recetores GPS, digitalização à mão, etc.);
- (b) Dispositivos de processamento e armazenamento (consistem na unidade central de processamento (CPU), a memória principal (RAM), dispositivos de armazenamento externos ligados a um computador e a interface do usuário);
- (c) Dispositivos de saída (por exemplo, impressoras).

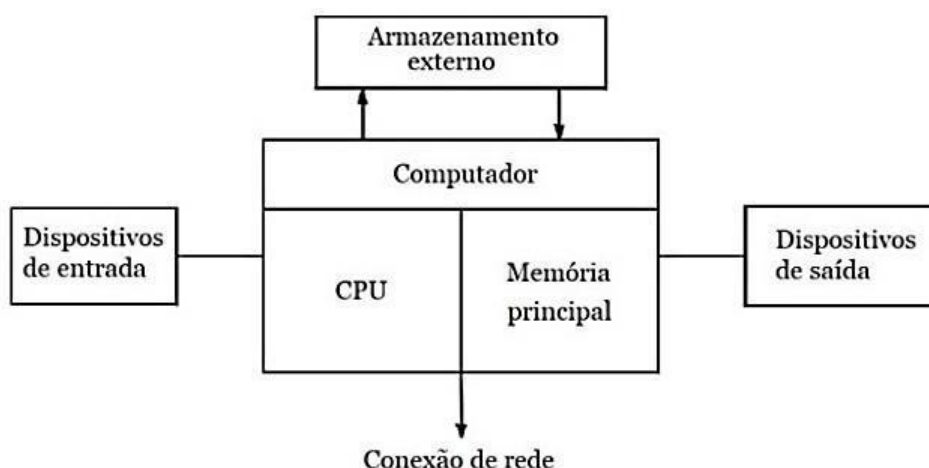


Figura 2.2: Componentes do *Hardware* (Adaptado de Konecny, 2014)

Os autores Jensen & Jensen (2013), dividem os computadores, utilizados para análises SIG, em três grupos principais:

- (a) Computadores pessoais (computadores relativamente de baixo custo como portáteis, computadores de escritório, tablets, etc.);
- (b) Computadores estações de trabalho (computadores, em geral, com processadores com maior capacidade RAM, unidades de disco rígido maiores e alta qualidade de exibição de gráficos permitindo uma execução de análise SIG mais rápida que um computador pessoal);

(c) Computadores *mainframe* (computadores ideais para situações que requerem um uso intensivo do CPU e que realizam cálculos mais rapidamente que os computadores pessoais ou estações de trabalho, mas têm geralmente um elevado custo de compra e manutenção).

O *software*, comercial ou de uso gratuito, é executado localmente num dispositivo ou remotamente numa rede e abrange servidores web, programas e aplicações nas quais se pode, de entre várias operações, fazer a gestão, análise e exibição de dados (Chang, 2019; Longley et al., 2005).

Os dados, ou base de dados, fornecem as bases para a representação digital de aspetos de uma determinada área específica próxima ou da superfície terrestre e, devido a incluírem um elevado número de coordenadas de localização e por vezes muitas imagens *raster*, as bases de dados espaciais tornam-se frequentemente grandes, sendo desafiante a gestão e análise de grandes dados (Longley et al., 2005, 2015).

Os profissionais são uma das componentes essenciais do SIG que definem, projetam e delineiam os projetos e objetivos para utilizar o SIG e que fazem a manutenção, fornecem e interpretam os dados e resultados. Os SIG necessitam igualmente de uma organização que gira e estabeleça procedimentos, pontos de controlo, dados padronizados e outros mecanismos que garantam que as actividades de SIG não excedam os orçamentos definidos e mantenham a alta qualidade atendendo, simultaneamente, às necessidades da organização. Por último, um dos componentes mais importantes é a rede, que permitiu a rápida comunicação e partilha de informações digitais (Chang, 2019; Longley et al., 2005, 2015).

Tal como definido anteriormente, SIG pode ser descrito de forma geral como um sistema de base de dados computadorizado que permite a recolha, armazenamento, manipulação, visualização e disponibilização de dados espaciais em formato digital.

Os dados espaciais, um dos componentes do SIG, são o produto inicial para a constituição da informação geográfica, são constituídos por um conjunto de coordenadas que os localizam num determinado espaço e têm como objetivo a representação das diferentes características do mundo real e, através de dois tipos fundamentais de modelos de representação geográfica, o modelo matricial (*raster*) e o modelo vetorial (Figura 2.3), é possível simplificar a informação espacial (Silva et al., 2016).


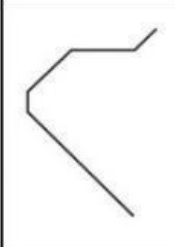
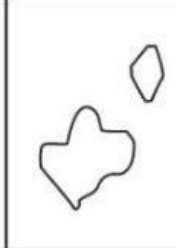



	Pontos	Linhas	Polígonos
Vetorial			
Matricial/ Raster			

Figura 2.3: Modelos de dados: vetorial e matricial (Adaptado de Chang, 2019)

O modelo de dados vetorial apoia-se em representações bidimensionais, com dados de natureza discreta compostas por objetos estáticos e fronteiras geográficas bem definidas sendo possível, também, representar uma terceira dimensão mediante a projeção no espaço bidimensional e representação com recurso a objetos 2D (Matos, 2008; Silva et al., 2016). Este modelo utiliza pontos, linhas e polígonos para representar as características espaciais e é muito utilizado em mapas (ex. dispositivos de navegação GPS, google maps etc.) devido à natureza precisa da sua representação, eficiência de armazenamento, qualidade da produção cartográfica e ampla disponibilidade de ferramentas para operações como projeções de mapas e análise cartográfica (Jensen & Jensen, 2013; Longley et al., 2015; Silva et al., 2016)

No modelo vetorial é possível associar atributos (valor de áreas, descrições, nomes etc.) armazenados em tabelas (tabelas de atributos) que podem ser visualizados e editados (Silva et al., 2016).

O modelo de dados matricial, matrizes ou *raster*, representa o espaço através de uma matriz de células (ou pixéis), geralmente quadradas, organizada em linhas e colunas e onde cada célula contém um valor à qual é atribuído uma determinada propriedade ou atributo, representando a matriz a variação das propriedades ao longo de todo o espaço (Jensen & Jensen, 2013; Silva et al., 2016).

Ao invés dos dados vetoriais, os dados matriciais apenas contêm informação relativa a um único atributo não sendo possível armazenar atributos adicionais a cada célula e, são exemplo de dados de natureza matricial, *rasters* com variação espacial da temperatura, relevo, batimetria etc. (Silva et al., 2016).

A Tabela 2.1 enumera algumas das vantagens e desvantagens descritas por Reddy (2008) para cada um dos tipos de modelos, destacando-se como principais vantagens do modelo matricial a estrutura simples dos dados, a facilidade e eficiência na realização de

operações de sobreposição e como desvantagens a maior dificuldade em representar relações topográficas ou a necessidade de maior armazenamento.

No caso do modelo vetorial algumas das vantagens são a estrutura de dados mais compacta, que resulta na necessidade de uma menor capacidade de armazenamento e o fornecimento de codificação eficiente, que permite realizar operações que requerem informações topológicas, como a análise de rede. Em contrapartida, para além da estrutura de dados ser mais complexa as operações de sobreposição são mais difíceis de implementar e a representação da variabilidade espacial é ineficiente.

Tabela 2.1: Vantagens e desvantagens modelo vetorial vs. matricial (Adaptado de Reddy, 2008)

Modelo matricial	Modelo vetorial
Vantagens	Vantagens
<ol style="list-style-type: none"> 1. É uma estrutura de dados simples. 2. As operações de sobreposição são implementadas de forma fácil e eficiente. 3. A alta variabilidade espacial é representada de forma eficiente num formato matricial. 4. O formato matricial é mais ou menos necessário para uma manipulação eficiente e aprimoramento de imagens digitais 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fornece uma estrutura de dados mais compacta que o modelo matricial. 2. Fornece uma codificação de topologia eficaz, resultando numa implementação mais eficiente de operações que requerem informações topológicas, como por exemplo análises de rede. 3. O modelo vetorial é mais adequado para suportar gráficos que se aproximam de mapas desenhados à mão.
Desvantagens	Desvantagens
<ol style="list-style-type: none"> 1. A estrutura de dados matricial é menos compacta. 2. Maior dificuldade em representar relações topológicas. 3. A saída dos gráficos é menos apelativa porque os limites tendem a ter uma aparência em blocos, em vez das linhas suaves dos mapas desenhados à mão. Isto pode ser superado utilizando um grande número de células, mas pode resultar em arquivos inaceitavelmente grandes. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. A estrutura de dados vetorial é mais complexa do que a matricial. 2. As operações de sobreposição são mais difíceis de implementar. 3. A representação da alta variabilidade espacial é ineficiente. 4. A manipulação e aprimoramento de imagens digitais não podem ser feitos de modo efetivo no domínio vetorial.

Analisando a Figura 2.4 é possível constatar que desde a década de 60 do século XX, ao longo do desenvolvimento dos SIG, os custos de *hardware* têm descido constantemente e só a partir do ano 1990 tornou-se apropriado à utilização generalizada dos SIG com benefícios assinaláveis relativamente aos custos de produção e gestão (Matos, 2008).

No caso do *software*, após um aumento na década de 80 do séc. XX, os custos têm igualmente caído progressivamente. Com a maior capacidade do *hardware* e *software* e desenvolvimento de novos equipamentos (como os computadores pessoais, telemóveis,

tablets e outros) e a criação de *softwares* de acesso gratuito, o SIG e a gestão de dados tornaram-se mais eficientes e económicos. Por outro lado, os custos da aquisição de dados atingiram o pico entre a década de 75 e 80 e têm-se mantidos altos, mas constantes, em grande parte devido a dados que são continuamente atualizados para refletir modelos em tempo real (Konecny, 2014).

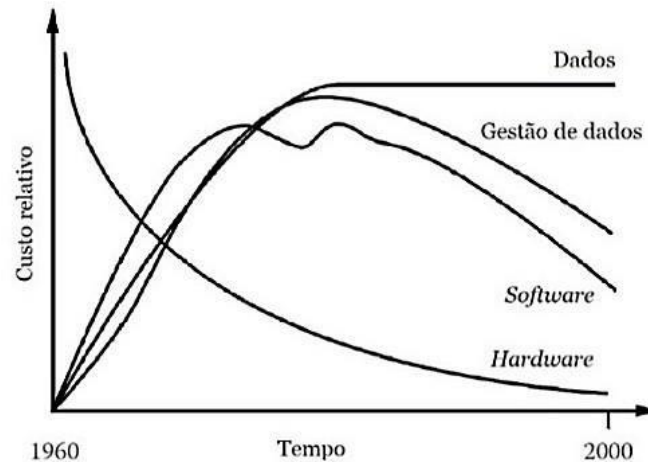


Figura 2.4: Evolução dos custos dos diferentes componentes do SIG (Adaptado de Konecny, 2014)

Em Matos (2008), são reconhecidos cinco grande domínios que recorrem à utilização de informação geográfica: a informação cadastral e infraestruturas, o planeamento e gestão de recursos naturais, a modelação espacial, a visualização de informação geográfica e a navegação.

Atualmente, globos virtuais permitem os utilizadores explorar qualquer local na superfície terrestre usando interfaces interativas intuitivas que combinam mapas, modelos de terreno, imagens de satélite e informações com poderosos motores de busca, também a adição de ferramentas de mapeamento em produtos baseados na web, permitem aos utilizadores adicionar os seus próprios dados espaciais sobre um mapa pré-existente (Heywood, Cornelius, & Carver, 2011).

Chang (2019) afirma que nos últimos anos à medida que os SIG foram evoluindo surgiram duas tendências. Uma das tendências é a inclusão dos SIG na tecnologia geoespacial integrando-os a outros dados geoespaciais como imagens de satélite ou dados de GPS e a outra tendência está relacionada com o vínculo dos SIG a serviços web, tecnologia móvel, meios sociais e computação em nuvem.

Numa publicação em SSIUSC (2020), os dados em tempo real, as informações direcionadas ao consumidor e a inteligência artificial são tidas como as três principais tendências na evolução dos SIG. Num outro artigo em SSIUSC (2021), o autor sugere que a realidade aumentada (RA) e a realidade virtual (RV) podem ser o futuro dos SIG, indicando

que a RA é uma das áreas na qual o SIG móvel e o 3D provavelmente convergirão, exemplo desta tendência é o famoso jogo Pokémon Go. Mas as aplicações de RA direcionadas ao SIG não se limitam apenas ao entretenimento, estas podem ser utilizadas em diversas áreas deste a arquitetura, áreas da geologia como petróleo e minas, planejamento urbano entre outras.

No mesmo artigo é ainda mencionado que a tecnologia SIG começa também a ser utilizada para realizar mapeamento de interiores (ex. criação de mapas internos de edifícios grandes e complexos com fim a auxiliar equipas de emergência ou planos de evacuação) e que o grande próximo passo no futuro dos SIG será o aproveitamento da crescente rede de dispositivos conectados à internet que compõe a designada “Internet das Coisas” (IoT, *Internet of Things*), resultando no aumento da capacidade de os profissionais de SIG obterem dados em tempo real.

2.2 Geomática

A geomática é um termo relativamente recente que deriva da evolução da topografia dita convencional. O termo foi criado na Universidade Laval no Canadá, no início dos anos 80, com base no conceito de que a crescente potencialidade da computação eletrónica estava a revolucionar a topografia e as ciências da representação, e que era cada vez mais compatível o uso do design informático para tratar e processar grandes quantidades de dados através de uma forma interdisciplinar e interoperável (Gomarasca, 2009).

Na topografia convencional os topógrafos realizavam medições utilizando métodos terrestres e os cálculos, análises, relatórios, folhas de cálculo e mapas eram realizados de forma manual, com um número reduzido de observações, sendo cada medição muito demorada e limitada no tempo, atualmente, um topógrafo tem à sua disposição ferramentas para medir e recolher informações através de equipamentos que incluem instrumentos eletrónicos que medem distâncias e ângulos de forma automática, sistemas de levantamento por satélite, sistemas laser e sistemas de imagem modernos entre outros (Ghilani & Wolf, 2015).

As áreas práticas da topografia mudaram drasticamente nos últimos anos, em grande parte devido ao desenvolvimento de novas tecnologias, que forneceram novos instrumentos e ferramentas para medir, recolher, exibir e divulgar informações nomeadamente a nível digital, e também devido à crescente preocupação global e local em questões ambientais, impulsionando o desenvolvimento de instrumentos e métodos de gestão e de monitorização de diversos recursos (água, solo, ar, etc.) e fenómenos (poluição, mudanças climáticas, etc.),

tendo sido necessário criar um novo termo, a geomática, para englobar as novas evoluções e técnicas que se separaram das técnicas aplicadas na topografia dita convencional (Ghilani & Wolf, 2015).

A geomática é considerada, em Ghilani & Wolf (2015), como a disciplina que engloba todos os métodos de medição e recolha de informações, da Terra e o meio envolvente, processamento dessas informações e divulgação das mesmas numa variedade de produtos para uma ampla gama de clientes.

No entanto o termo não é definido do mesmo modo variando de autor para autor por exemplo, G.C. (2020), define geomática como uma disciplina moderna que integra as tarefas de recolha, armazenamento, processamento, modelação, análise e entrega de informações espacialmente referenciadas e abrange as disciplinas de topografia, hidrografia, mapeamento, deteção remota e SIG.

Aronoff (2005) considera que para além da topografia e deteção remota, a geomática engloba também as disciplinas de CIG, fotogrametria, cartografia entre outras.

Por sua vez Gomasasca (2009), define geomática como uma área multidisciplinar que integra os instrumentos e técnicas apropriadas para recolher, armazenar, integrar, modelar, analisar, recuperar, transformar, exibir e distribuir dados espaciais georreferenciados de diferentes fontes com características bem definidas e precisas, continuidade e em formato digital. Considera que a geomática é constituída pelos seguintes componentes:

- | | |
|--|----------------------------------|
| (a) Ciências da computação; | (g) SIG; |
| (b) Geodesia; | (h) Ontologia; |
| (c) Topografia (planimetria, levantamento topográfico etc.); | (i) GPS; |
| (d) Cartografia; | (j) Sistemas laser; |
| (e) Fotogrametria; | (k) Sistemas de apoio à decisão; |
| (f) Deteção remota; | (l) Sistemas de especialistas. |

2.3 Deteção remota

A primeira utilização do termo deteção remota ocorreu nos finais da década de 50 pela geógrafa do *U.S. Office of Naval Research* (ONR) (Gabinete de Pesquisa Naval) Evelyn Pruitt, sendo o termo promovido, no início da década de 60, num artigo preparado por geógrafos do ONR como definição dos métodos para recolha da informação geográfica, ou seja, informação referente a fenómenos distribuídos espacialmente num determinado

espaço/superfície por medição e interpretação de imagens fotográficas e numéricas (Casaca, Matos, & Baio, 2005; Dempsey, 2019).

Atualmente, a detecção remota pode ser definida como a ciência, tecnologia e arte de adquirir informações de alvos/recursos sem existir um contacto físico entre estes e o dispositivo utilizado na recolha de informação, ou seja, baseando-se na energia refletida ou emitida pela superfície/objetos, tendo, os sistemas de detecção remota, a função de recolha, processamento, análise e classificação, visualização e armazenamento e manipulação dos dados matriciais obtidos, dados que podem assumir diversas formas incluído fotografia aérea, imagens digitais de satélite e radar (Aronoff, 2005; Cosme, 2012; Matos, 2008; NRC, 2019).

Um dos objetivos da detecção remota é a produção de mapas topográficos e mapas temáticos. As suas principais características como fonte de informação para georreferenciamento são: a visão global das condições da superfície que não são obtidas com as técnicas tradicionais, possibilitar observações cíclicas que permitem comparações temporais e atualização de dados obtidos e aquisições multiespectrais (Gomarasca, 2009).

No processo de detecção remota estão integrados sete componentes/fases principais (Figura 2.5) (García, Brondo, & Pérez, 2012; Konecny, 2014; NRC, 2019):

- (1) a fonte de energia - o sol ou, no caso da detecção ativa, uma lâmpada, laser emissor de ondas rádio, etc.;
- (2) a interação entre a radiação emitida/refletida com a atmosfera - no percurso entre a fonte de energia e o alvo e entre o alvo e o sensor a radiação entra em contacto e interage com a atmosfera;
- (3) a interação da radiação com o alvo - depois de percorrer a atmosfera a radiação interage com o alvo dependendo das propriedades do alvo e da radiação;
- (4) um sensor - colocado sob uma plataforma, recolhe, regista e armazena a informação sobre a radiação refletida pelo alvo;
- (5) fase de transmissão, receção e processamento da radiação captada pelo sensor - os valores da radiação, captada pelo sensor, são transmitidos a uma estação de receção e processamento e os dados são processados/convertidos em imagens;
- (6) fase de interpretação e análise - após processada, a imagem é interpretada e analisada de modo a extrair informações sobre o alvo;
- (7) fase de aplicação - as informações extraídas das imagens sobre o alvo podem ser aplicadas para resolver um determinado problema específico, como por exemplo, caracterização e avaliação de uma zona de estudo para fins de conhecimento e gestão da área em questão.

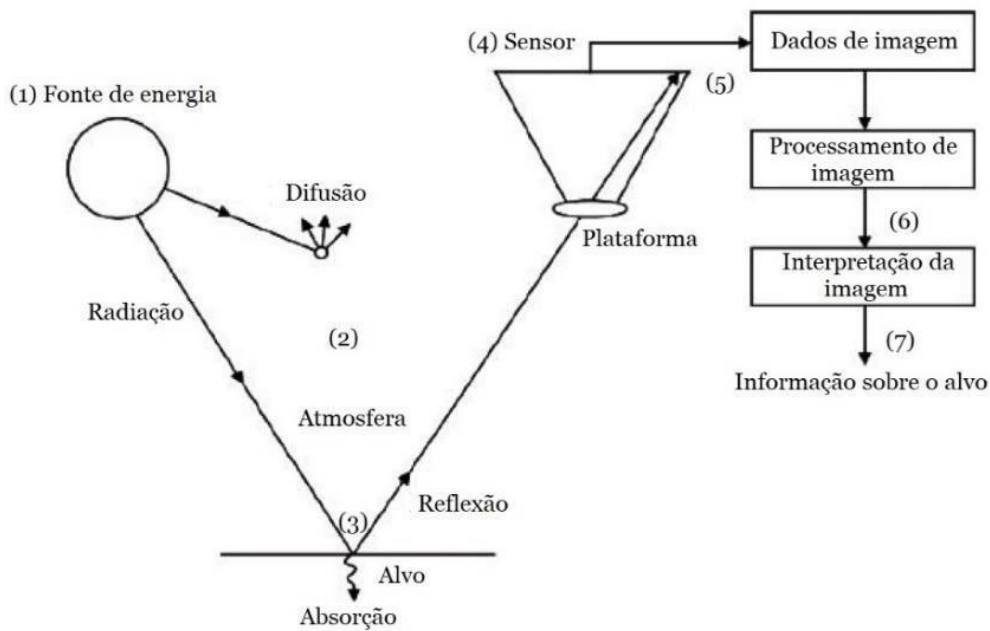


Figura 2.5: Componentes do processo de detecção remota (Adaptado de Konecny, 2014)

Pode-se enquadrar a detecção remota em duas categorias: detecção remota com sensor passivo ou com sensor ativo.

Na detecção remota passiva (Figura 2.6) é utilizada uma fonte de energia natural para iluminar o alvo em estudo, como por exemplo o sol, medindo, o sensor, a energia refletida ou emitida pela superfície/alvo (Davids & Rouyet, 2018). A maioria dos instrumentos utilizados na detecção remota passiva obtém imagens através da radiação visível, infravermelho próximo e infravermelho térmico do espectro eletromagnético (Figura 2.7) (Smith, 2000).

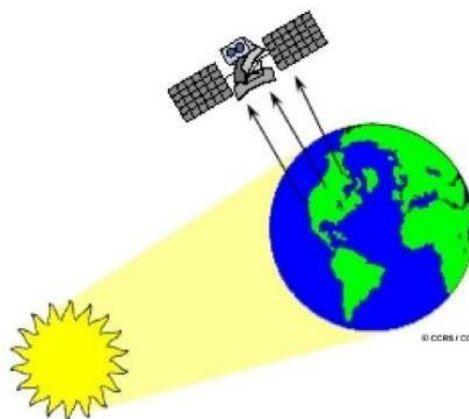


Figura 2.6: Sensor passivo (Adaptado de NRC, 2019)

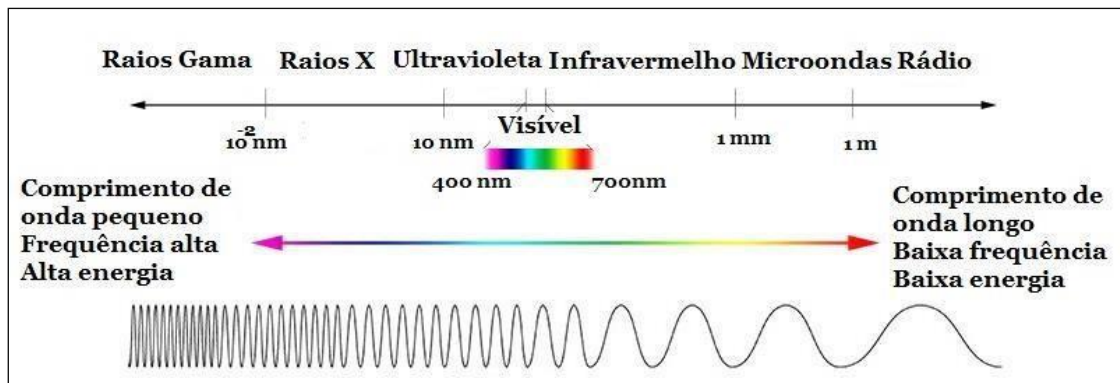


Figura 2.7: Espectro eletromagnético (Adaptado de NASA's Imagine the Universe, 2013)

No caso da detecção remota ativa (Figura 2.8) o sensor utiliza a sua própria fonte de energia emitindo radiação que é direcionada ao alvo em estudo sendo posteriormente a radiação, refletida pelo alvo, detetada e medida pelo sensor, utilizando-se, por exemplo, ondas micro-ondas (Davids & Rouyet, 2018; NRC, 2019; Smith, 2000).

Alguns sensores passivos são por exemplo o radiômetro, espectroradiômetro e espectrômetro e como sensores ativos são exemplo o Radar, o SAR (Radar de Abertura Sintética), o InSAR (Radar Interferométrico de Abertura Sintética), o LIDAR (Detecção de Luz e Radar) e Altimetro Laser (Liang, Li, & Wang, 2012).

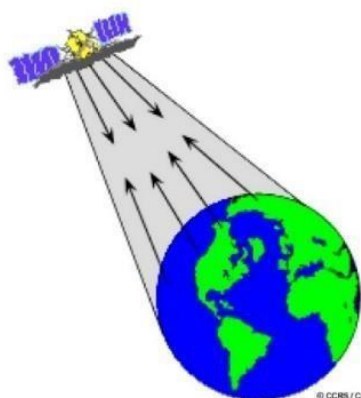


Figura 2.8: Sensor ativo (Adaptado de NRC, 2019)

Existem diversas plataformas (Figura 2.9) utilizadas em detecção remota para transporte do sensor, distinguindo-se plataformas espaciais (ex. satélites), aéreas (ex. helicópteros, aviões, dirigíveis e veículos aéreos não tripulados) e terrestres (ex. guindastes, torres e veículos) (Gomasca, 2009).

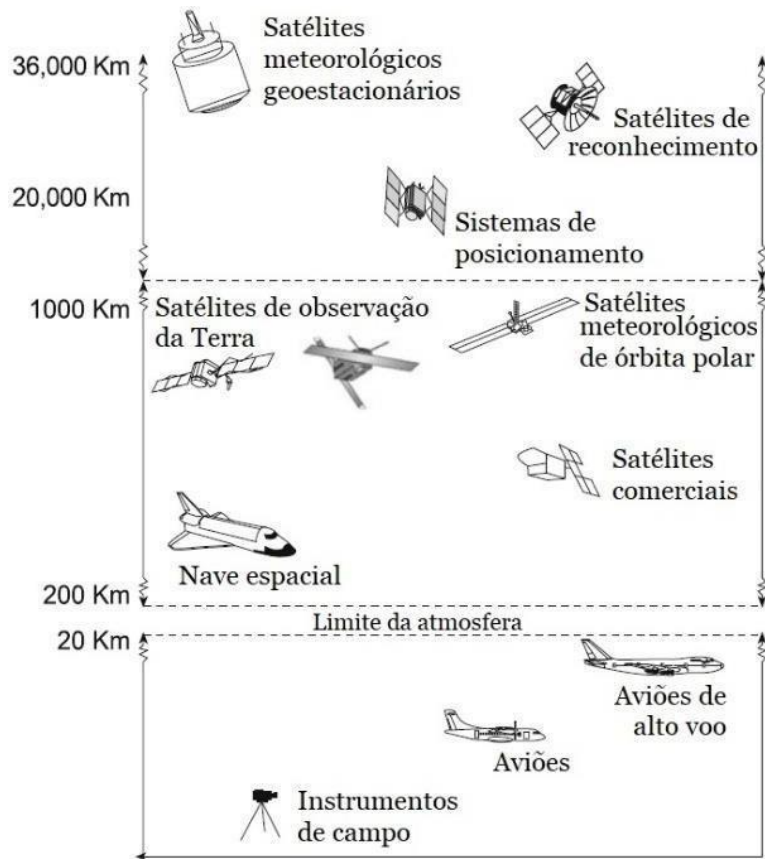


Figura 2.9: Tipos de plataformas (Adaptado de Gomasasca, 2009)

Um dos aspetos a ter em consideração na escolha do sensor para uma determinada aplicação é o tipo de resolução que é requerida, a qual vai determinar as características dos dados. São distinguidos quatro tipos de resolução (Davids & Rouyet, 2018):

- (a) Resolução espacial;
- (b) Resolução espectral;
- (c) Resolução radiométrica;
- (d) Resolução temporal.

A resolução espacial é uma medida da menor distância angular ou linear que um sensor remoto pode capturar da superfície terrestre (García et al., 2012). No caso de sensores passivos, a resolução espacial (Figura 2.10) depende principalmente do campo de visão instantâneo (o IFOV, *Instantaneous Field of View*), que corresponde à visibilidade em cone do sensor e que determina a área observada a partir de uma determinada altitude e momento no tempo, sendo o tamanho da área visualizada determinado multiplicando o IFOV pela distância do solo até ao sensor e designando-se, a área do solo, por célula de resolução, a qual determina a máxima resolução espacial do sensor (NRC, 2019). Numa imagem, a célula de resolução é designada de pixel sendo constituída, uma imagem, por vários pixéis (Gupta, 2018). Quanto maior a resolução espacial menor o tamanho da célula de resolução/pixel e maior o pormenor (Gupta, 2018; NRC, 2019).

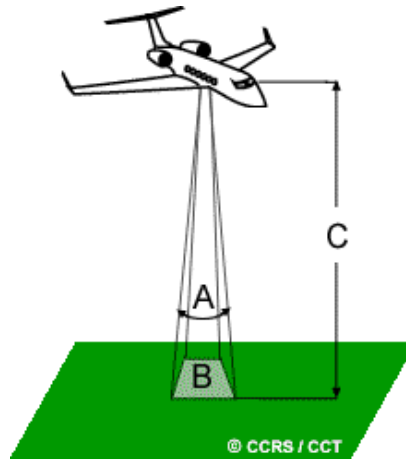


Figura 2.10: Resolução espacial (A- IFOV, B- área visualizada, C- distância entre o solo e o sensor) (NRC, 2019)

Segundo Aronoff (2005), o termo resolução espectral é utilizado para referir o número e largura das bandas espectrais detetadas por um determinado sensor remoto. Quanto maior a resolução espectral mais estreitas serão as bandas e o sensor irá ser capaz de distinguir características espectrais menores (Davids & Rouyet, 2018).

Os sensores podem ser classificados como sensores pancromáticos, multiespectrais ou hiperespectrais.

Um sensor pancromático utiliza apenas uma única banda larga no espectro do visível, registrando o brilho geral de uma cena, não distinguindo individualmente os vários comprimentos de onda (filme preto e branco (Figura 2.11), produzindo, assim, imagens a preto e branco (Aronoff, 2005; Liang et al., 2012; NRC, 2019).

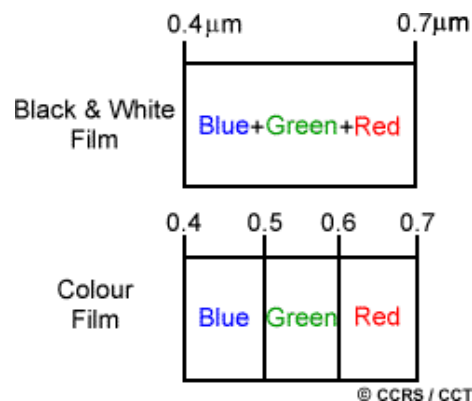


Figura 2.11: Filme preto e branco vs. Filme colorido (NRC, 2019)

Um sensor multiespectral regista energia em várias faixas de comprimentos de onda (visível, infravermelho próximo ou infravermelho térmico) separadas em várias bandas espectrais, sendo o filme colorido (Figura 2.11) sensível à energia refletida na porção do espectro do visível com resolução espectral mais alta devido a registar, individualmente, a

energia refletida nos comprimentos de onda azul, verde e vermelho do espectro, permitindo representar as várias cores com base na refletância em cada uma das faixas distintas de comprimento de onda (Aronoff, 2005; Liang et al., 2012; NRC, 2019).

Sensores hiperespetrais são sensores multiespectrais avançados que detetam centenas de bandas espectrais muito estreitas nas faixas do visível, infravermelho próximo e médio e ultravioleta do espectro eletromagnético e são muito úteis no mapeamento geológico e de vegetação (Aronoff, 2005; NRC, 2019).

A resolução radiométrica é, tal como refere Matos (2008), a capacidade que um determinado sensor tem em diferenciar a amplitude da energia eletromagnética que recebe, ou seja, é a capacidade de medir a diferença de intensidade nas diferentes bandas (Davids & Rouyet, 2018) e quanto maior o número de níveis de intensidade que o sensor consegue distinguir maior será a resolução radiométrica e conseqüentemente maior será a capacidade de distinguir alvos que têm padrões de resposta espectral semelhantes mas níveis de intensidade luminosa ligeiramente diferentes (Aronoff, 2005).

A resolução radiométrica é comumente expressa como o número de dígitos binários (bits) necessários para armazenar o valor de nível máximo, ou seja, o número máximo de níveis de intensidade disponíveis, correspondendo, o número de bits, ao intervalo de números digitais positivos que variam de 0 a uma potência selecionada de 2 (ex. 1 bit = $2^1 = 2$ níveis ou 4 bits = $2^4 = 16$ níveis) (Figura 2.12) (NRC, 2019; Reddy, 2008).

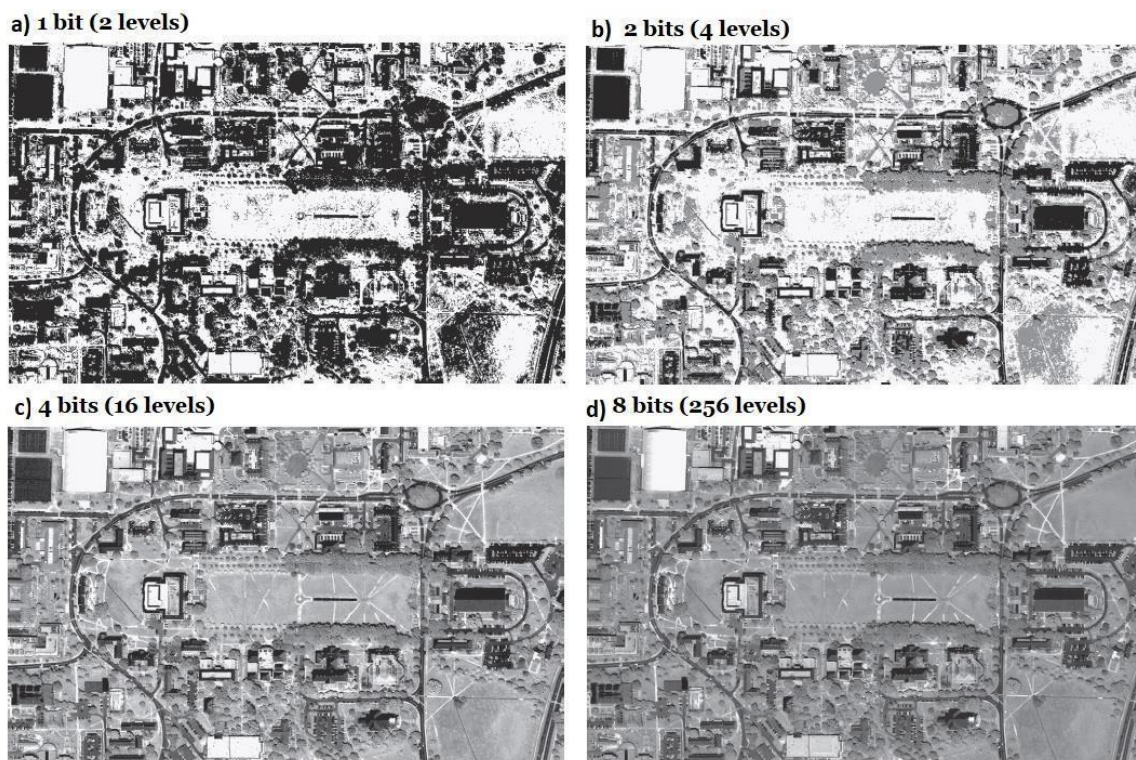


Figura 2.12: Resolução radiométrica: a) 1 bit b) 2 bits c) 4 bits d) 8 bits (Adaptado de Liang et al., 2012)

Os dados de imagem são geralmente exibidos num gama de tons de cinza em que o preto é representando pelo valor 0 e o branco é representado pelo valor máximo (NRC, 2019). Uma imagem de banda única (pancromática) é normalmente codificada utilizando 8 bits, ou seja, 256 níveis de intensidade variando de preto (0) a branco (255), uma imagem colorida é geralmente gerada a partir de um conjunto de três imagens de 8 bits exibidas em azul, verde e vermelho oferecendo mais de 16 milhões de combinações possíveis (256x256x256) (Aronoff, 2005).

A resolução temporal é definida como uma medida da frequência, ou ciclo de repetição (ou também designado intervalo de revisita), com que um sensor revisita e obtém imagens da mesma área da superfície terrestre, obtendo imagens multi-temporais, sendo que quanto mais frequente a cobertura, menor será o tempo de revisita e maior será a resolução temporal (Aronoff, 2005; Liang et al., 2012).

A obtenção de imagens multi-temporais e a comparação das mesmas permite para além de detetar mudanças nas características espectrais dos recursos ao longo do tempo, sejam elas de ocorrência natural ou induzidas antropicamente, realizar modelos de previsões (Jensen & Jensen, 2013; NRC, 2019).

O fator tempo é relevante para diversas situações como por exemplo para a interpretação de fenómenos naturais sazonais (diversos fenómenos variam ao longo do tempo como por exemplo a vegetação (Figura 2.13) e humidade do solo etc.), monitorização de fenómenos de curta média duração (por exemplo inundações, derrames de óleo, construções etc.) ou quando determinadas áreas da superfície oferecem pouca visibilidade (por exemplo devido a nuvens persistentes) (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015; NRC, 2019).



Figura 2.13: Resolução temporal: diferenças na vegetação - (a) verão (b) primavera (Adaptado de Lillesand et al., 2015)

A radiação emitida pela fonte luminosa, se não for absorvida ou dispersada na atmosfera, quando atinge a superfície terrestre pode ser absorvida, transmitida (a radiação

passa através do alvo) ou refletida pelo alvo (Figura 2.14), podendo a reflexão ser especular ou difusa (Figura 2.15) (Gomasasca, 2009; NRC, 2019).

Em detecção remota apenas a radiação emitida e refletida pelos objetos é considerada (Gomasasca, 2009).



Figura 2.14: Tipos de interação radiação vs. alvo (A-Absorvido, R-Refletido, T-Transmitido, I-Energia incidente) (NRC, 2019)

Na reflexão especular a energia é refletida do alvo numa só única direção e na reflexão difusa a energia refletida do alvo é refletida quase uniformemente em todas as direções.

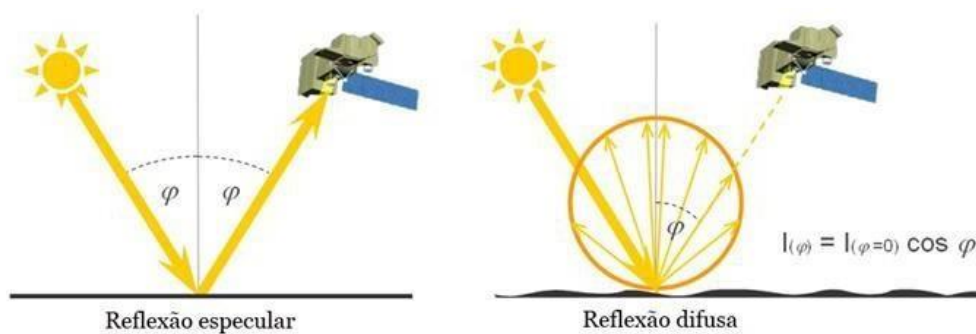


Figura 2.15: Reflexão especular vs. difusa (Adaptado de SEOS, 2021)

A maneira como um alvo particular reflete vai depender da rugosidade do mesmo em comparação com os comprimentos de onda da radiação incidente, ou seja, se os comprimentos de onda forem consideravelmente menores que as variações da superfície ou do tamanho das partículas que constituem a superfície, a reflexão difusa irá dominar. (NRC, 2019)

Dependendo da complexa composição do alvo (a sua estrutura, geometria e natureza) e dos comprimentos de onda da radiação envolvidos, as respostas aos mecanismos de absorção, transmissão e reflexão irão ser distintos (Gomasasca, 2009; NRC, 2019).

Medindo a energia que é refletida pelos alvos na superfície da Terra em vários comprimentos de onda diferentes, é possível construir a resposta espectral desse alvo, também designada de assinatura espectral, representando-a num gráfico que exibe a percentagem de radiação em diferentes comprimentos de onda refletida pelo alvo (Figura 2.16), designada como curva de resposta espectral (Aronoff, 2005; NRC, 2019).

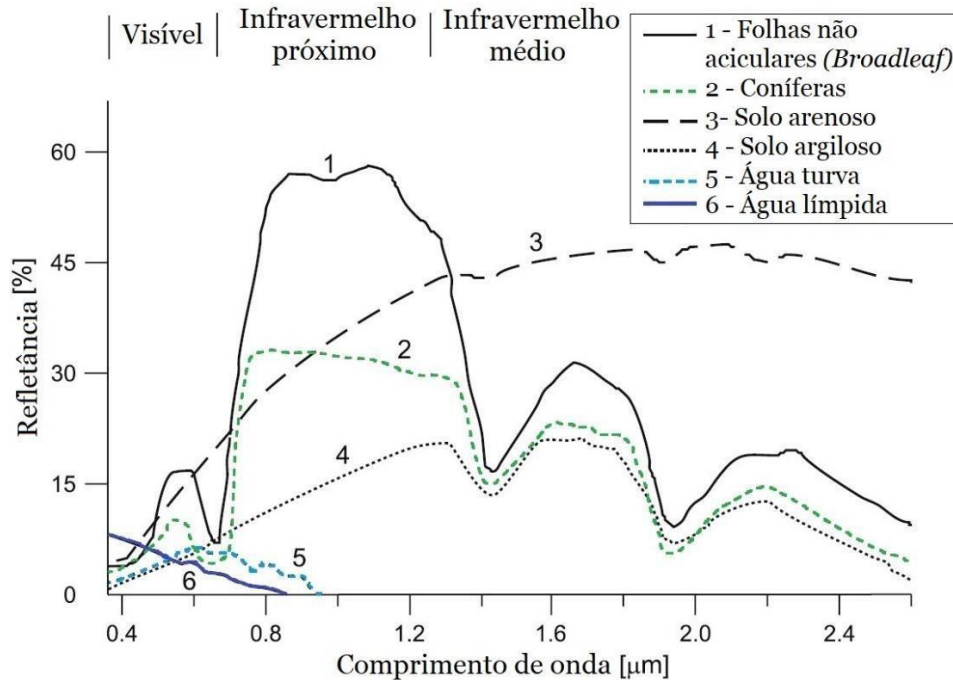


Figura 2.16: Resposta espectral para diferentes tipos de alvos (Adaptado de Gomasasca, 2009)

A comparação dos padrões de resposta nos diferentes comprimentos de onda permite, assim, distinguir e identificar possíveis alvos, por exemplo, no caso da água e vegetação, nos comprimentos de onda do visível apresentam uma resposta espectral semelhante, difícil de distinguir, mas no caso do infravermelho a resposta é muito diferente e as curvas raramente se cruzam (NRC, 2019).

No entanto, é necessário ter em atenção que a resposta espectral pode ser bastante variável para o mesmo tipo de alvo e/ou variar consoante a altura do dia, clima e localização, podendo os fatores que produzem as variações considerarem-se estáticos (declive e exposição do solo) ou dinâmicos (diferenças no comportamento espectral ao longo do tempo por exemplo a fase fenológica da vegetação, humidade superficial do solo, transparência atmosférica, posição do sol etc.), sendo por isso muito importante compreender os fatores que influenciam a resposta espectral dos alvos para interpretar corretamente a interação da radiação eletromagnética com a superfície (Gomasasca, 2009; NRC, 2019).

A deteção remota é habitualmente utilizada para planear, gerir, monitorizar e realizar previsões sobre um determinado recurso e as áreas de aplicação são as mais

diversificadas incluindo desde a agronomia (mapeamento das características do solo e de práticas de manejo do solo, monitorização, estimativas de colheita, etc.), planeamento florestal (monitorização ambiental e das culturas, inventário de tipo de culturas, mapeamento florestal, etc.), geologia (mapeamento litológico e estrutural, exploração mineral e hidrocarbonetos, monitorização ambiental etc.), oceanografia (monitorização de correntes, qualidade da água, fauna, previsões de tempestades, supervisão de derrames de óleo etc.) entre muitas outras áreas (Aronoff, 2005; NRC, 2019).

2.4 Fotogrametria

A Academia Francesa de Ciências anunciou, em 1839, que Jacques Mande-Daguerre criou oficialmente a fotografia, desenhada com luz, através da melhoria dos estudos anteriormente efetuados pelo já então falecido inventor Joseph Nicéphore Niépce (Gomasasca, 2009). Após a invenção da fotografia, o topógrafo militar Aimé Laussedat, no ano de 1851, construiu a primeira câmara que permitia realizar medições em fotografias (Konecny, 2014).

A fotogrametria, pertencendo ao ramo da geodesia mais concretamente à área da deteção remota (Linder, 2016), pode ser definida como a ciência, arte e tecnologia de obtenção de informações confiáveis, nomeadamente medidas espaciais e outras informações geométricas, a partir de fotografias (Ghilani & Wolf, 2015; Lillesand et al., 2015).

A fotogrametria é assim, uma técnica que permite medir um objeto sem tocá-lo podendo, a medição, ser realizada em duas ou três dimensões (2D e 3D) utilizando tanto fotogramas (imagens analógicas), adquiridas por câmaras fotogramétricas tradicionais, como imagens digitais (Gomasasca, 2009), sendo uma máquina fotogramétrica uma máquina construída em condições especiais, possuindo uma estrutura rígida que solidariza o sistema ótico e o plano imagem, de modo a serem eliminados certos defeitos para se conseguir que as fotografias se aproximem o mais possível de uma perspetiva (Casaca et al., 2005; Xerez, 1966).

Pode-se considerar que a evolução da fotogrametria se deu em 3 fases principais, ocorrendo a transição de uma fase para a outra em intervalos de 20 anos ou mais aproximadamente, sendo elas: a fase da fotogrametria analógica, fase da fotogrametria analítica e a atual fase da fotogrametria digital (Linder, 2016).

A fase da fotogrametria analógica corresponde à fase em que a fotogrametria (incluindo o trabalho de reconstrução da orientação das fotos, medições, mapeamento etc.)

era feita exclusivamente de forma ótico-mecânica, com instrumentos de grande porte, complicados e caros e que só poderiam ser manuseados por profissionais com experiência, os designados operadores fotogramétricos (Linder, 2016).

Segundo Linder (2016), a fase da fotogrametria analítica ocorre com o aparecimento dos computadores, que permitiram que a reconstrução da orientação se realizasse através de algoritmos, ou seja, através de fórmulas com determinados parâmetros (coeficientes) que eram calculadas e armazenadas num computador. Esta fase é caracterizada por equipamentos significativamente mais pequenos, mais baratos e de maior facilidade de manuseamento. No entanto nesta fase ainda eram utilizadas fotos analógicas sendo ainda necessário equipamento mecânico e ótico de alta precisão, dominado de *plotter* analítico.

Por último, surge a fase da fotogrametria digital, a fase atual, que é como o nome indica, caracterizada pelo aparecimento das fotos digitais em que todo o trabalho é efetuado e armazenado diretamente num computador capaz de lidar com fotos digitais de alta resolução (Linder, 2016).

Atualmente, a generalidade da informação cartográfica é produzida com recurso à fotogrametria (Matos, 2008).

Um levantamento fotogramétrico é considerado um levantamento em que são utilizadas fotografias, geralmente aéreas, conjuntamente com um levantamento de pontos de apoio no terreno visíveis na fotografia (McCormac, 2007).

A fotogrametria utiliza por base o modelo fotogramétrico estereoscópico (Figura 2.17).

No modelo estereoscópico é utilizado pares de fotografias tiradas de pontos diferentes, mas que abrangem uma mesma área comum, ou seja, duas fotografias com sobreposição que cobrem uma determinada área, tiradas a partir de diferentes posições da câmara (Casaca et al., 2005).

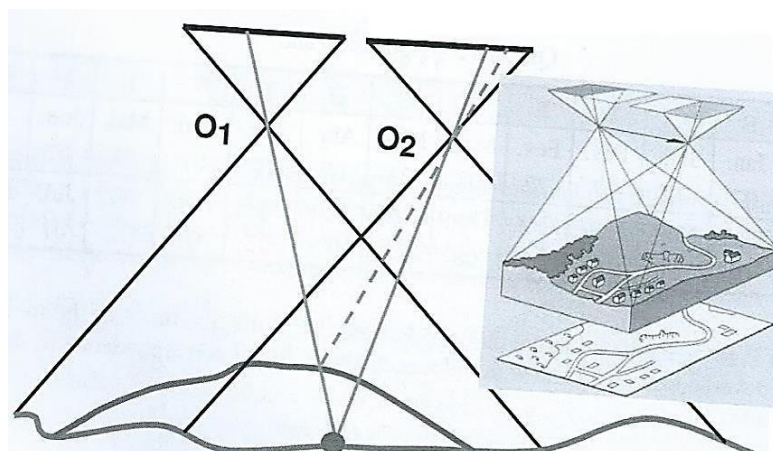


Figura 2.17: Par e o modelo estereoscópico (Casaca et al., 2005)

Segundo Casaca et al. (2005), as câmaras fotográficas são constituídas por vários elementos (Figura 2.18) de entre os quais:

- 1) Objetiva (sistema de lentes através da qual a luz refletida, pelos "objetos" exteriores, penetra na câmara);
- 2) Diafragma (orifício circular, de diâmetro variável, que regula o fluxo de luz que entra na câmara);
- 3) Obturador (mecanismo que impede, ou permite, a passagem de luz no diafragma);
- 4) Câmara escura (compartimento isolado, onde só a luz penetra através do diafragma);
- 5) Plano imagem (plano perpendicular ao eixo ótico da objetiva, materializado por uma película de plástico de forma rectangular, coberta por uma substância fotossensível colocada sob um suporte fixo, no fundo da câmara escura).



Figura 2.18: Elementos da câmara fotográfica (Adaptado de Inglesias, 2015)

A abertura do obturador, durante um intervalo de tempo curto, mas variável, vai permitir entrar uma pequena quantidade de luz pelo diafragma, que vai incidir sobre o plano de imagem, na câmara escura, e atuar sobre a substância fotossensível formando o negativo (Casaca et al., 2005).

2.4.1 Fotografia aérea

A partir da 1ª guerra mundial a fotogrametria terrestre foi substituída pela fotogrametria aérea em quase todos os levantamentos topográficos quer devido ao enorme incremento da aviação, quer como resultado dos sucessivos melhoramentos das máquinas fotográficas (Alves, Cruz, & Norte, 1988).

Na fotogrametria aérea, a área a cartografar é voada em fiadas sendo que, as fotografias numa mesma fiada têm de apresentar sobreposição longitudinal e as fotografias de fiadas adjacentes sobreposição lateral de modo a ser possível obter pares estereoscópicos sucessivos (Casaca et al., 2005; Matos, 2008).

A obtenção de fotografias aéreas é realizada em plataformas de voo equipadas com câmaras aerofotogramétricas seguindo um determinado plano de voo onde se deve definir os seguintes parâmetros (Matos, 2008):

- 1) Escala média da fotografia (altitude de voo e distância focal da câmara fotográfica);
- 2) Sobreposição entre fotografias (geralmente a sobreposição longitudinal não deve ser inferior a 60% e a sobreposição lateral 30%);
- 3) Valores tolerados para altura do sol acima do horizonte (de modo que as sombras na fotografia sejam as mínimas a altura do sol tem de ser suficientemente elevada condicionando assim, a hora e a época em que o voo é realizado).

As fotografias aéreas podem-se classificar em fotografias aéreas verticais (ou nadirais), quando o eixo ótico da câmara no momento da exposição encontra-se aproximadamente vertical com um desvio inferior a 4° , ou fotografias aéreas oblíquas (Casaca et al., 2005) podendo as fotografias oblíquas separarem-se em oblíquo baixo ou oblíquo alto, apresentando este último, uma imagem do horizonte (Lillesand et al., 2015) (Figura 2.19).

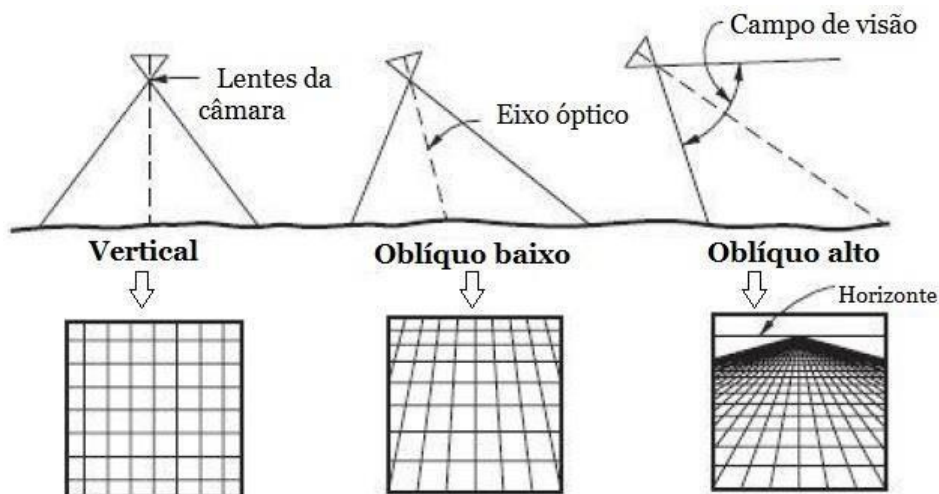


Figura 2.19: Orientação da câmara para os diferentes tipos de fotografia aérea (vertical e oblíquo) (Adaptado de Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014)

Os autores Casaca et al. (2005), consideram que a obtenção de fotografias verticais, mais difíceis de obter, requer de entre várias condições:

- 1) A utilização de plataformas com grande estabilidade durante o voo;
- 2) Condições atmosféricas favoráveis;
- 3) Navegação muito cuidada por parte do piloto.

2.5 Veículos aéreos não tripulados

A automação está presente há muito tempo e os veículos aéreos, para aplicações industriais, são utilizados desde o século XIX como por exemplo, o uso de balões em 1860 para captura de fotografias para fins de deteção remota, a utilização de pombos, com armações com câmaras fotográficas montadas no peito, no início do século XX para obtenções de fotografias aéreas ou a utilização de torpedos aéreos no início da Primeira Guerra Mundial que são considerados como os propulsores dos drones (Merkert & Bushell, 2020; Shahmoradi, Talebi, Roghanchi, & Hassanalian, 2020).

Veículos aéreos não tripulados (VANT), designados também como sistemas de aeronaves não tripuladas (SANT) ou mais usualmente drones, são tal como o nome sugere, veículos aéreos que não transportam um operador humano voando remotamente ou autonomamente (Hassanalian & Abdelkefi, 2017).

Segundo Kardasz, Doskocz, Hejduk, Wiejkt, & Zarzyck (2016), os Estados Unidos, Reino Unido, Rússia, Alemanha e Israel foram os primeiros países a iniciar pesquisas em veículos aéreos não tripulados e consideram Charles Kettering, um dos primeiros criadores de drones, construindo em 1915, com a colaboração de Elmer Sperry, Orville Wright e Robert Milikanem, uma aeronave chamada “Kettering Bug” que consistia num avião automático primitivo que com base em sensores era capaz de definir a sua altura, distância percorrida e posição.

Impulsionados principalmente por usos militares, especialmente pelo seu potencial reconhecido no apoio em guerras, os drones evoluíram rapidamente na última década começando cada vez mais a desenvolverem-se no sentido de aplicações civis (Watts, Ambrosia, & Hinkley, 2012), tendo sido produzido o primeiro veículo civil na década de 80 do séc. XX, no Japão, a pedido do Ministério da Agricultura, Florestas e Pescas (Kardasz et al., 2016).

O vínculo militar da maioria dos drones produziu uma dicotomia na natureza da maioria dos sistemas, por um lado os drones eram capazes de transportar poderosos e precisos sensores, mas que tendiam a ser grandes e dispendiosos e por outro, pequenas

plataformas não tinham cargas úteis para fornecer dados precisos pois, apesar de serem mais adequados aos orçamentos e demandas logísticas de muitas organizações de pesquisa, não foram projetados para a entrega de dados de nível de pesquisa, no entanto, o programa ERAST (Aeronaves de Pesquisa Ambiental e Tecnologia de Sensor) da NASA na década de 90, marcou os primeiros passos importantes no desenvolvimento de protocolos e recursos para a utilização de drones para apoiar a pesquisa científica, fazendo com que no final da década de 90, inspiradas pelos esforços da NASA, pequenas organizações desenvolvessem e modificassem drones de modo a adequarem-se às suas próprias necessidades de pesquisa que incluíam diversas aplicações como por exemplo, amostragem atmosférica ou monitorização da vegetação para pastagem (Watts et al., 2012).

Nos últimos anos têm-se observado um crescente interesse e desenvolvimento dos VANT por parte das comunidades acadêmicas e industriais (Shahmoradi et al., 2020).

Dependendo do tipo de missão, a configuração dos drones pode variar amplamente, existindo diversas classificações para os drones com base em diferentes parâmetros (Hassanalian & Abdelkefi, 2017).

Em Watts et al. (2012), por exemplo, é utilizada uma classificação de drones para usos científicos civis, que é sustentada em descrições de plataformas militares existentes baseadas em características como o tamanho, duração do voo e capacidade e distingue seis classes:

- (1) MAV ou NAV (Micro ou Nano Veículos Aéreos);
- (2) VTOL (Decolagem e Aterragem Vertical);
- (3) LASE (Baixa Altitude, Curta Duração);
- (4) LALE (Baixa Altitude, Longa Duração);
- (5) MALE (Média Altitude, Longa Duração);
- (6) HALE (Alta Altitude, Longa Duração).

Comumente, os drones são diferenciados segundo as seguintes categorias (Figura 2.20):

- a) Asa fixa - Tal como o nome indica têm asas fixas, não têm VTOL, sendo necessário uma pista de decolagem e aterragem. Podem em geral voar grandes distâncias e em altas velocidades durante um longo período de tempo cobrindo uma grande área (Ferrovial, 2021; S.T.A., 2021);
- b) Multi-rotor - Drone com vários rotores que permitem um grande controle sobre a posição e enquadramento e que têm VTOL. São acessíveis e menos dispendiosos e ideias para obtenção de fotografias aéreas, mas com a desvantagem de terem um curto alcance e menos estabilidade a pairar (Chapman, 2016; Krishnaraj et al., 2021);

- c) Rotor único - Semelhantes aos helicópteros em design e estrutura, possuem apenas um rotor grande e um pequeno na cauda para controlar a direção. Permitem maiores tempos de voo e podem ser movidos por motores a gás. São em geral mais eficientes que os drones multi-rotor, mas têm menor estabilidade (Chapman, 2016; Krishnarajet al., 2021);
- d) Drones híbridos - Combinam as características do drone de asa fixa e rotor. Permitem decolagem e aterragem vertical. Não são muito comuns devido a apresentarem dificuldade de voo (Chapman, 2016; Ferrovia, 2021).

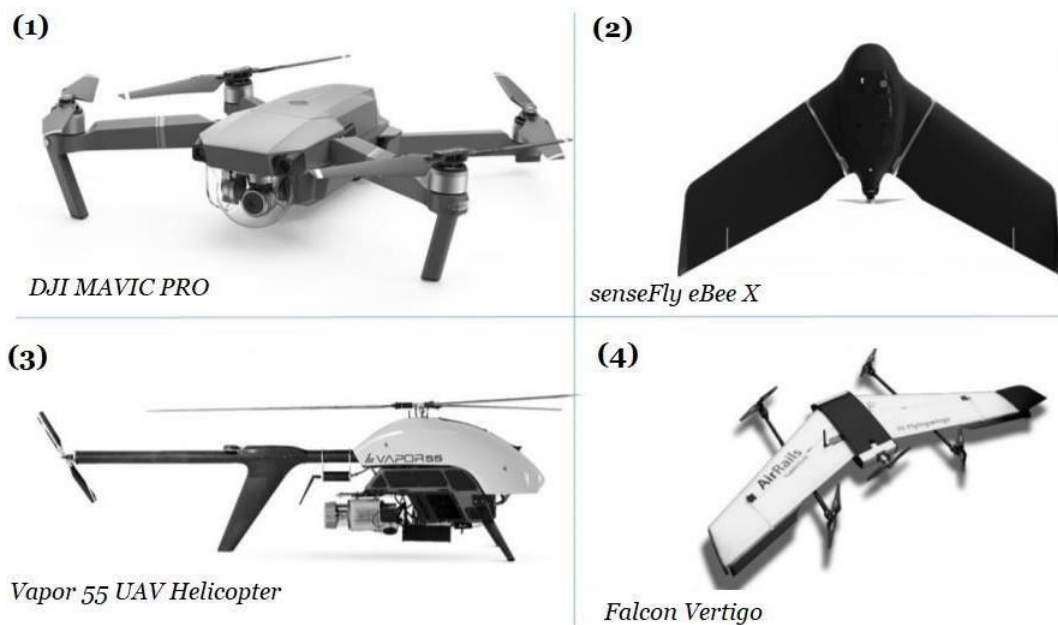


Figura 2.20: Tipos de drones (1) Multi-rotor (2) Asa fixa (3) Rotor único (4) Híbrido asa fixa VTOL (Adaptado de Tkáč & Mésároš, 2019)

Os autores Watts et al. (2012), consideram que um drone é constituído por três principais elementos:

- (a) Componente da aeronave;
- (b) Carga útil do sensor;
- (c) Estação terrestre de controlo.

Por sua vez Kardasz et al. (2016), consideram que um drone é composto por dois principais sistemas:

- (a) Sistema de movimento (constituído pela armação, hélices e motores e bateria);
- (b) Sistema de controlo e comunicação (constituído pelo controlador de voo, controlador eletrónico de velocidade, placa de alimentação, módulo SIM, câmara de proximidade e um recetor).

Para um caso de um drone multi-rotor, Grind Drone (2021), considera que este é constituído por onze principais componentes (Figura 2.21):

- | | |
|---------------------------------------|-----------------|
| 1. Hélices padrão; | 7. Recetor; |
| 2. Hélices <i>pusher</i> ; | 8. Transmissor; |
| 3. Motores <i>brushless</i> ; | 9. Módulo GPS; |
| 4. Trem de aterragem; | 10. Bateria; |
| 5. Controlo eletrónico de velocidade; | 11. Câmara |
| 6. Controlo de voo; | |



Figura 2.21: Componentes de um drone (ex. drone multi-rotor) (Adaptado de Grind Drone, 2021)

As áreas de aplicação dos drones são diversas e podem ser categorizadas de diferentes maneiras. Os autores Hassanalian & Abdelkefi (2017), construíram um esquema (Figura 2.22) que separa a aplicabilidade dos drones consoante o tipo de zona de voo (exterior ou interior), o tipo de missão (civil ou militar) e o tipo de ambiente (aquático, subaquático, terrestre, aéreo ou espacial).

Em Flyability (2021), são destacadas as seguintes áreas e indústrias para aplicação dos drones com fins comerciais e civis:

- | | |
|-----------------------|---------------------------------|
| a) Agricultura; | f) Indústria do petróleo e gás; |
| b) Indústria química; | g) Segurança pública; |
| c) Conservação; | h) Seguradoras; |
| d) Construção, | i) Entre outros. |
| e) Indústria mineira; | |



Figura 2.22: Aplicações dos drones (Adaptado de Hassanalian & Abdelkefi, 2017)

O tipo de dados que podem ser obtidos com os drones também são diversos incluindo desde (Flyability, 2021):

- 1) Dados visuais (são o tipo de dados comuns mais obtidos);
- 2) Dados LIDAR (um sensor LIDAR permite por exemplo penetrar a cobertura das árvores e mesmo do solo e revelar estruturas não visíveis a olho nu, também são muito usados para a geração de mapas tridimensionais de uma zona);
- 3) Dados térmicos (depois dos dados visuais, os dados térmicos são o segundo tipo de dados mais recolhidos, podem de entre várias funções auxiliar, por exemplo, corporações de bombeiros em incêndios);
- 4) Dados multiespectrais (este tipo de dados pode ser utilizado, por exemplo, na agricultura e conservação monitorizando a saúde das plantas e árvores ou apoiar equipas de busca e salvamento ou autoridades em encontrar restos humanos);
- 5) Dados hiperespectrais (tal como os dados multiespectrais, este tipo de dados também pode ser utilizado na agricultura para monitorização da saúde das colheitas ou utilizado, por exemplo, na área da segurança e defesa identificando potenciais alvos indesejados e perigosos).

2.6 Indústria mineira e a utilização dos SIG e Detecção Remota

A detecção remota teve uma grande influência no desenvolvimento inicial dos SIG tanto a nível instrumental, como fonte de dados importantes, como também promotora de uma perspectiva global integrada das características e recursos da Terra. A disponibilidade de dados em formato digital e o desenvolvimento de alta tecnologia e softwares de análise de imagem permitiram a integração de informações obtidas por detecção remota e análises SIG. Atualmente a maioria dos pacotes de software SIG podem facilmente importar, exibir e manipular dados de detecção remota. (Aronoff, 2005).

O SIG e a detecção remota são comumente utilizados por grandes empresas de exploração mineira para exploração, avaliação de impacto ambiental e gestão contínua de minas, existindo vários criadores de softwares, como a ESRI, por exemplo, que criaram aplicações SIG desenvolvidas especificamente para serem utilizadas na área da indústria mineira (Werner, Bebbington, & Gregory, 2019).

Como alternativa aos métodos convencionais de levantamento, que muitas vezes são trabalhosos e requerem acesso ao local, Davids & Rouyet (2018) expõem os seguintes métodos de detecção remota:

1. Laser *scanning* ou LIDAR (terrestre (TLS) ou aerotransportado (ALS)):
 - As tecnologias ALS ou TLS são cada vez mais utilizadas para substituir métodos fotogramétricos tradicionais e permitem criar modelos de nuvem de pontos 3D detalhados da superfície e criar modelos de elevação digitais pormenorizados. Uma vantagem do laser *scanning* aerotransportado é que permite a filtração da vegetação de modo que a superfície do solo e as estruturas sob a vegetação possam ser mapeadas com precisão.
2. Fotogrametria através de veículos não tripulados:
 - Apesar da tecnologia SfM (*Structure from Motion*) já ter sido originalmente desenvolvida em 1990, o seu uso na área das geociências aumentou exponencialmente nos últimos anos com o crescimento da disponibilidade de veículos aéreos não tripulados de baixo custo e câmaras de baixo custo, mas com boa qualidade. A tecnologia SfM, é uma tecnologia de levantamento topográfico que surgiu dos avanços da visão computacional e fotogrametria tradicional e que permite produzir nuvens de pontos densas e 3D de alta qualidade de uma superfície com um custo financeiro mínimo (Carrivick, Smith, & Quincey, 2016). O método SfM pode ser utilizado, por exemplo, com fotos tiradas com recurso aos veículos aéreos não tripulados para posteriormente criar

modelos digitais de elevação detalhados para mapear e monitorizar mudanças topográficas.

Outro método descrito por diversos autores é a detecção remota multiespectral e hiperespectral.

Por exemplo, Kirsch et al. (2018), destacam a importância das imagens hiperespectrais ao fornecerem um meio adequado para mapear remotamente as variações composicionais nas informações geológicas.

Já os autores Davids & Rouyet (2018) falam da detecção remota multiespectral e hiperespectral por via aérea ou via satélite como meio fornecedor de informações valiosas sobre a mineralogia e geologia da superfície que pode ser um indicador indireto para a geologia subterrânea e presença de corpos de minério.

A detecção remota multiespectral e hiperespectral tem por base as características de absorção no espectro eletromagnético para os diferentes minerais ou grupo de minerais (como por exemplo minerais portadores de ferro, minerais de argila, carbonatos, sulfatos e micas) (Figura 2.23), sendo principalmente relevante o uso de bandas do SWIR (infravermelho de ondas curtas) para distinguir grupos minerais (Davids & Rouyet, 2018).

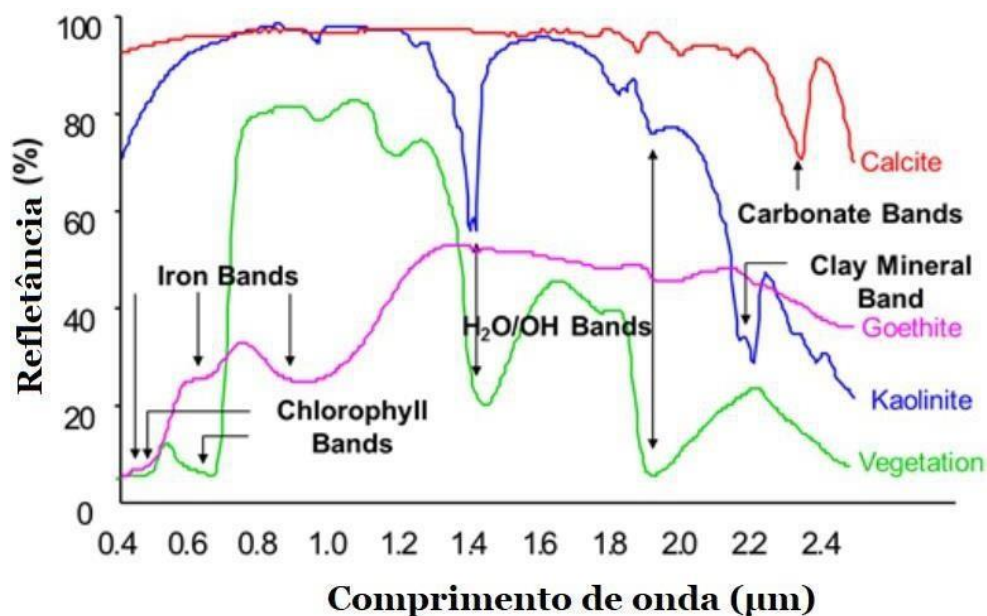


Figura 2.23: Refletância espectral de alguns minerais e vegetação (Adaptado de Davids & Rouyet, 2018)

Tem sido demonstrado também que o uso de detecção remota hiperespectral nomeadamente nas bandas do VNIR (visível e infravermelho próximo) a SWIR (400-2500 nm) pode ser utilizada para quantificar várias propriedades do solo, pois como certos

grupos de minerais têm características espectrais específicas, existe um potencial para usar essas características para mapear as concentrações no solo (Davids & Rouyet, 2018).

Após a recolha de dados por detecção remota, por exemplo recorrendo aos veículos aéreos não tripulados, é possível com recurso aos SIG processar e manipular os dados e realizar diversas análises que podem apoiar a gestão mineira nas diferentes fases da mina.

Através da revisão bibliográfica efetuada pelos autores Choi, Baek, & Park (2020), é possível destacar algumas aplicações dos SIG na indústria mineira em diferentes fases como por exemplo:

1. Fase de planeamento:

- Estimativa de reserva de minério - tecnologias baseadas em SIG, como análise espacial e direcionamento, exposição, visualização de dados 3D e processamento, podem ser utilizadas para identificar e avaliar a localização, tamanho e geometria de depósitos minerais enterrados no subsolo.
- Projeto de infraestrutura da mina - as funções de SIG como o processamento e direcionamento de dados espaciais e análise de redes pode ser útil na decisão do melhor posicionamento das infraestruturas como por exemplo armazéns, depósito de resíduos, linhas de energia e estradas.

2. Fase de operação:

- Otimização da operação de transporte de minério - através de ferramentas de visualização espacial é possível monitorizar o sistema de transporte de minério e recorrendo a análises de redes como o LCPA (análise da rota de menor custo) otimizar as rotas de transporte.
- Projeção e gestão de sistema de comunicação sem fio - utilizando SIG baseado na web e análise espacial, por exemplo, em minas a céu aberto e minas subterrâneas, é possível criar sistemas de comunicação sem fio que podem ser instalados para recolher dados relativos à operação do equipamento, segurança do trabalho e processos de produção num servidor web em tempo real.
- Sistemas de suporte à decisão - as funções SIG baseadas num banco de dados espacial e visualização 3D também podem ser utilizadas para gerir os dados da mina e tomar decisões que aumentem a qualidade das operações da mina tornando-as mais eficazes.
- Projeção e gestão do sistema de ventilação, segurança e rede de drenagem da mina - com a construção de um banco de dados e com análises espaciais baseadas em SIG é possível contribuir para a projeção

de um modelo de rede de ventilação subterrânea e gestão de sistemas de drenagem para promover a segurança e prevenir acidentes durante as operações da mina.

3. Fase de gestão ambiental:

- Gestão das operações e riscos induzidos na mina - funções de SIG, como construção e mapeamento de banco de dados espacial, geoprocessamento, análises de bacias hidrográficas e redes de drenagem, modelações espaciais entre outras, permitem otimizar a gestão das operações mineiras e controlar os riscos inerentes induzidos sendo possível, por exemplo, realizar previsões sobre a vibração gerada pelas detonações ou impacto da poeira, avaliar a estabilidade de taludes, monitorizar o movimento do solo, subsidência da mina, ou a contaminação da água ou solo etc.

2.6.1 Os drones e a indústria mineira

Os veículos aéreos não tripulados (VANT), ou drones, um dos instrumentos utilizados na detecção remota, têm ganho cada vez mais destaque na indústria mineira. Através de dados recolhidos em 2019 pela GlobalData, de 179 locais, foi possível verificar um aumento na utilização de drones na indústria mineira de 20% em 2018 para 26% em 2019 (Lee, 2021).

Há alguns anos atrás, a aplicação dos drones na exploração mineira ainda era muito pouco comum, mas hoje em dia essa situação alterou-se e os drones estão de forma significativa cada vez mais a ser utilizados para apoiar operações mineiras (Dukowitz, 2020). Tal como constata o CEO Ray Gillinder da HeLImetrex, num artigo publicado pela Mining (2020), há dez anos atrás era quase impossível convencer um topógrafo de minas a utilizar um drone, algo que atualmente é cada vez mais aceitável.

A popularidade dos drones na indústria mineira cresceu significativamente e estes têm vindo a demonstrar a grande vantagem e benefícios da sua utilização. Nos últimos anos, os drones permitiram solucionar maneiras mais económicas e seguras de realizar levantamentos e recolha de dados através de detecção remota e ocorreu o desenvolvimento da integração de diversos tipos de sensores em drones relevantes para o mapeamento geológico e exploração mineral (EIT RawMaterials, 2020; Mining, 2020; Salmirinne, Heincke, Jackisch, & Saartenoja, 2020).

Dukowitz (2020) considera que um dos grandes principais benefícios é a segurança que os drones concedem na indústria mineira, pois o trabalho de extração é particularmente perigoso por exemplo, devido à instabilidade de taludes, perigo de colapso repentino ou condições instáveis em locais de explosão que tornam perigoso a presença humana.

Em Wingtra (2021), são destacados três principais benefícios dos drones:

1. Medições altamente precisas – a recolha de dados com recurso ao drone (Figura 2.24) permite a obtenção de milhares de pontos, o que o torna mais preciso que um levantamento realizado por métodos tradicionais (ex. estações totais) (Figura 2.25), permitindo também reduzir os desvios nos cálculos de volume do *stock*, gerar ficheiros base aprimorados para o *stock* e produzir demonstrações financeiras e verificações regulares mais precisas;

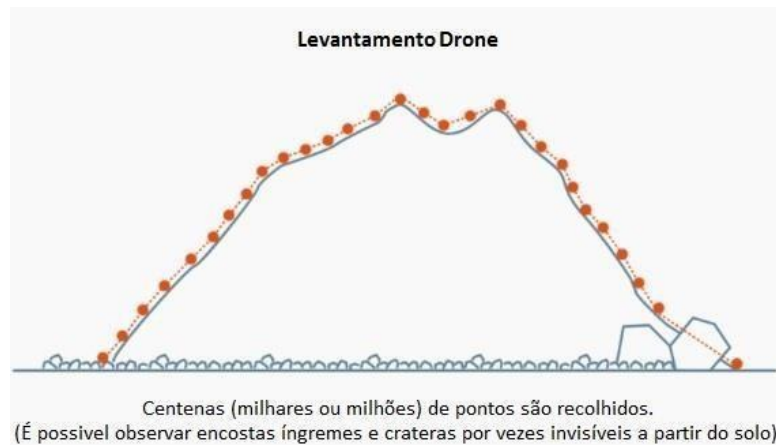


Figura 2.24: Levantamento com drone (Adaptado de Wingtra, 2021)



Figura 2.25: Levantamento tradicional GNSS (Adaptado de Wingtra, 2021)

2. Levantamentos mais rápidos, cíclicos e a baixo custo – a recolha de dados com recurso ao drone para além de não necessitar da presença de um topógrafo no

local é até 30 vezes mais rápida que os métodos tradicionais em terra. A recolha de dados pode ser repetida mais vezes, ajustada de forma fácil às necessidades e, as alterações verificadas entre dois levantamentos, podem ser rastreadas e destacadas automaticamente;

3. Maior gestão da segurança do local e dos trabalhadores – o drone permite realizar levantamentos de partes da mina ou pedreira que são normalmente de difícil acesso com equipamentos de levantamentos tradicionais e, para além disso, tem a vantagem de não interferir com o fluxo das operações e movimento das máquinas. O levantamento com drone elimina ainda o perigo inerente ao fato de os trabalhadores caminharem em zonas perigosas e instáveis, o que o torna 100% seguro.

Um artigo, da GlobalData Thematic Research (2021), destaca o que considera ser as seis principais tendências da utilização atual e futura dos drones na indústria mineira a:

- (a) Gestão de segurança do local;
- (b) Gestão das barragens de rejeitos;
- (c) Levantamentos automáticos e mapeamento;
- (d) Monitorização e inspeção;
- (e) Otimização das estradas de transporte;
- (f) Gestão de *stocks*.

Os drones são em geral utilizados, na indústria mineira, para capturar dados visuais dos materiais, dados que podem ser convertidos em diversos *outputs* incluído fotos, vídeos, mapas 3D e ortofotomapas, nuvens de pontos, modelos digitais de terreno, malhas 3D texturizadas etc. (Dukowitz, 2020; Wingtra, 2021).

Os veículos aéreos não tripulados podem ser um importante contributo e utilizados em todas as fases da exploração mineira (Figura 2.26), desde a fase de pesquisa e prospeção até ao encerramento da mina e recuperação ambiental.



Figura 2.26: Fases da exploração mineira (Adaptado de Diário da República, 2012)

Considerando três fases principais na exploração mineira, a fase de pesquisa e prospeção (*exploration*), fase de exploração/extração (*exploitation*) e fase de

encerramento e recuperação (*reclamation*), para cada uma, Park & Choi (2020) estudando aproximadamente 65 referências bibliográficas, identificaram as seguintes aplicabilidades dos drones (Figura 2.27):

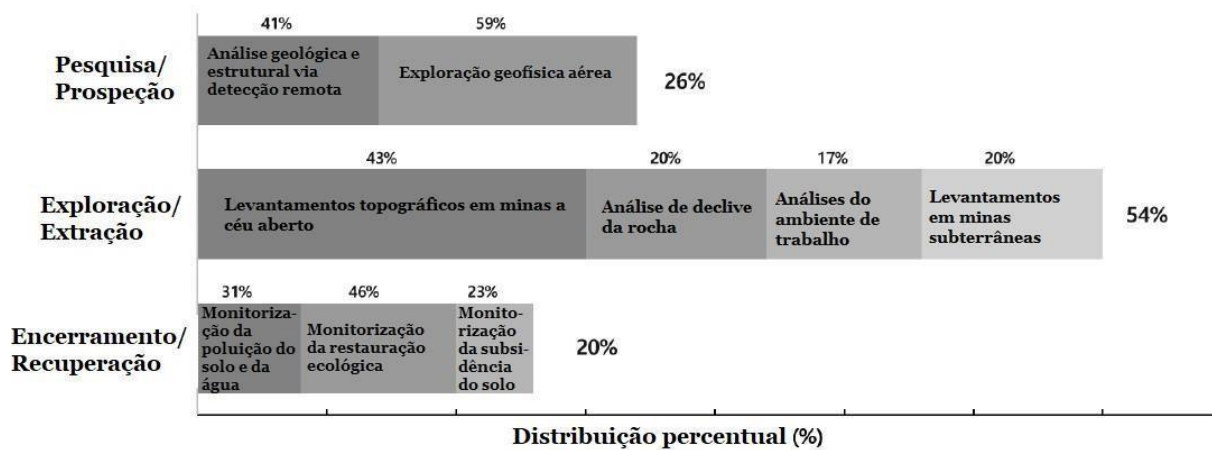


Figura 2.27: Percentagem da utilização dos drones e principais aplicabilidades para cada fase do processo de exploração mineira, com base em bibliografia revista por Park & Choi (2020) (Adaptado de Park & Choi, 2020)

1. Fase pesquisa e prospecção:

- a. Análise geológica e estrutural: os drones, equipados com câmaras digitais, são utilizados essencialmente para a obtenção de imagens RGB, multiespectrais e hiperespectrais para serem posteriormente processadas e analisadas de modo a medir e identificar as propriedades da superfície em estudo. É possível, por exemplo, criar um modelo digital 3D de alta resolução de um afloramento e/ou um modelo digital da superfície (MDS) através do conjunto de fotografias aéreas retificadas obtidas pelo drone. Ou ainda, utilizando os drones conjuntamente com algoritmos *machine learning* (ML), desenvolver tecnologias de automação para classificar litologias. O *Machine Learning* (ML) corresponde a um tipo de Inteligência Artificial (AI) que permite que determinados aplicativos de *software* se tornem mais precisos na previsão de resultados sem serem explicitamente programados para tal, utilizando os algoritmos ML como entrada para prever novos valores de saída (Burns, 2021).
- b. Exploração geofísica aérea: cada vez mais, os drones, acoplados a diversos instrumentos como por exemplo magnetómetros, têm sido utilizados para a aquisição de dados geofísicos como por exemplo informações sobre o campo magnético da Terra causado pelo contraste de propriedades magnéticas, para fins da exploração mineral e identificação de depósitos

minerais, devido à sua maior acessibilidade em terrenos íngremes e de difícil acesso e ao seu custo mais baixo quando comparado com levantamentos geofísicos tradicionais.

2. Fase de exploração/extração:

- a. Levantamento topográfico em minas a céu aberto: os drones são majoritariamente utilizados para obter fotografias aéreas da mina para posteriormente serem gerados Modelos Digitais de Superfície (MDS) Modelos Digitais de Terreno (MDT) e modelos tridimensionais. Alguns dos objetivos da recolha de dados pelos drones passa, por exemplo, pela reconstrução da geometria da mina, analisar e avaliar alterações na superfície, calcular e avaliar volumes de *stock*, etc.
- b. Análise de declives: os drones são utilizados para mapear as vertentes, analisar as características do talude, como por exemplo, a análise de estabilidade e descontinuidade dos maciços rochosos, a classificação litológica dos maciços e fazer o levantamento e monitorização dos deslizamentos.
- c. Análise dos ambientes de trabalho: para além da obtenção de fotografias aéreas, os drones quando acoplados com diversos sensores, como sensores térmicos e de poeiras por exemplo, podem realizar a monitorização da qualidade do ar, temperatura, humidade do local, podendo ainda ser um importante contributo na monitorização dos trabalhadores e das operações que estão a decorrer facilitando o fluxo das mesmas, aumentando a segurança, e permitindo também monitorizar acidentes, desastres e possíveis missões de resgate.
- d. Levantamento em minas subterrâneas: devido às condições de baixa visibilidade, aberturas confinadas, interferências magnéticas e ausência de cobertura GPS os drones, em ambiente mineiro subterrâneo, ainda não são muito utilizados, mas, no entanto, começam a ser desenvolvidos drones equipados com câmaras de alta resolução, luzes LED, sensores térmicos, SONAR, sensores IMU e entre outros instrumentos que permitem a obtenção de informações úteis como imagens (térmicas, espectrais etc.), dados de navegação e alcance sonoro, distâncias, obtenção de modelos 3D das galerias, entre outros, em locais perigosos e de difícil acesso. Uma Unidade de Medição Inercial (IMU) é um dispositivo eletrónico que mede e relata a força específica de um corpo, a taxa angular e, por vezes, a orientação do corpo, usando uma combinação de acelerómetros, giroscópios e/ou magnetómetros (PTRobotics, 2021).

3. Fase de encerramento e recuperação:
 - a. Monitorização da poluição do solo e água: os drones são utilizados essencialmente para adquirir imagens hiperespectrais e investigar a concentração de minerais perigosos (com recurso por exemplo, a drones equipados com espectrómetros de raios gama leves). São também utilizados por exemplo para fazer a recolha de amostras de água, solo etc. através de sensores e instrumentos instalados nos drones.
 - b. Monitorização da recuperação ecológica/ ambiental: os drones são utilizados para analisar e entender a distribuição da vegetação através da obtenção de imagens multiespectrais ou imagens de infravermelho próximo. Permitem também monitorizar a evolução de todas as fases de encerramento e requalificação ambiental e dinamizar os impactos negativos.
 - c. Monitorização da subsidência do solo: a escolha de utilização de drones ao invés do ser humano para monitorizar e investigar zonas de subsidência é óbvio devido à falta de segurança que estes locais proporcionam. Os drones são assim utilizados para recolher imagens para analisar e monitorizar barragens de rejeitos, áreas de subsidência originadas por exploração mineira subterrânea, entre outros, permitindo realizar diversos mapas como mapas de declives, profundidades, mapas de risco etc.

3 Metodologia

Muitas pequenas ou médias empresas mineiras, neste caso, a céu aberto, possuem um relativo baixo número de trabalhadores recorrendo, a maioria das empresas, a profissionais externos, de forma esporádica, para realizar diversos levantamentos da mina como, por exemplo, levantamentos topográficos. Esta solução para além de implicar um custo cada vez que é necessário contratar os serviços, resulta também num maior défice de informações e dados que são muito espaçados no tempo, o que torna menos eficiente toda a gestão da mina.

Alguns dos objetivos deste trabalho são mostrar que:

- a integração das várias componentes da geomática, como a deteção remota (utilizando os drones) e levantamentos de campo tradicional, com os sistemas de informação geográfica pode ser uma ferramenta de apoio poderosa na gestão mineira a céu aberto, mostrando algumas análises e produtos finais (“*deliverables*”) que são possíveis de obter;
- é possível, com um custo relativamente acessível, uma pequena ou média empresa, formando um ou mais trabalhadores e investindo num drone e software, melhorar substancialmente toda a gestão da mina, incluindo, a redução de custos a longo prazo, a obtenção de dados atualizados sempre que necessário, monitorizar e aumentar a eficácia de todas as etapas e operações inerentes à mina e contribuir para uma exploração mineira mais segura e sustentável com a redução de riscos intrínsecos.

De modo a tentar responder a estes objetivos foi esquematizada uma proposta de metodologia para o trabalho (Figura 3.1) dividindo-se o fluxo de trabalho em dois grandes grupos, o trabalho de campo e o trabalho de gabinete.

O primeiro ponto em ter em consideração antes do avanço do trabalho em si, é a recolha de toda a informação já existente quer em formato SIG, PDF ou quer em outros tipos de formato como dados em papel que podem ser digitalizados, georreferenciados e armazenados digitalmente através de ferramentas SIG.

Mapas geológicos, dados geofísicos (ex. mapas de eletrorresistividade, de gravimetria...), dados geoquímicos (ex. mapa de concentrações mineralógicas, mapas de teores...), dados de stocks, mapas topográficos e entre outros são tudo dados e mapas que podem posteriormente serem utilizados e sobrepostos aos mapas e modelos obtidos com dados recolhidos pela deteção remota a fim de completar, corrigir, aprimorar a informação e construir novos mapas e modelos de previsão mais pormenorizados e eficientes.

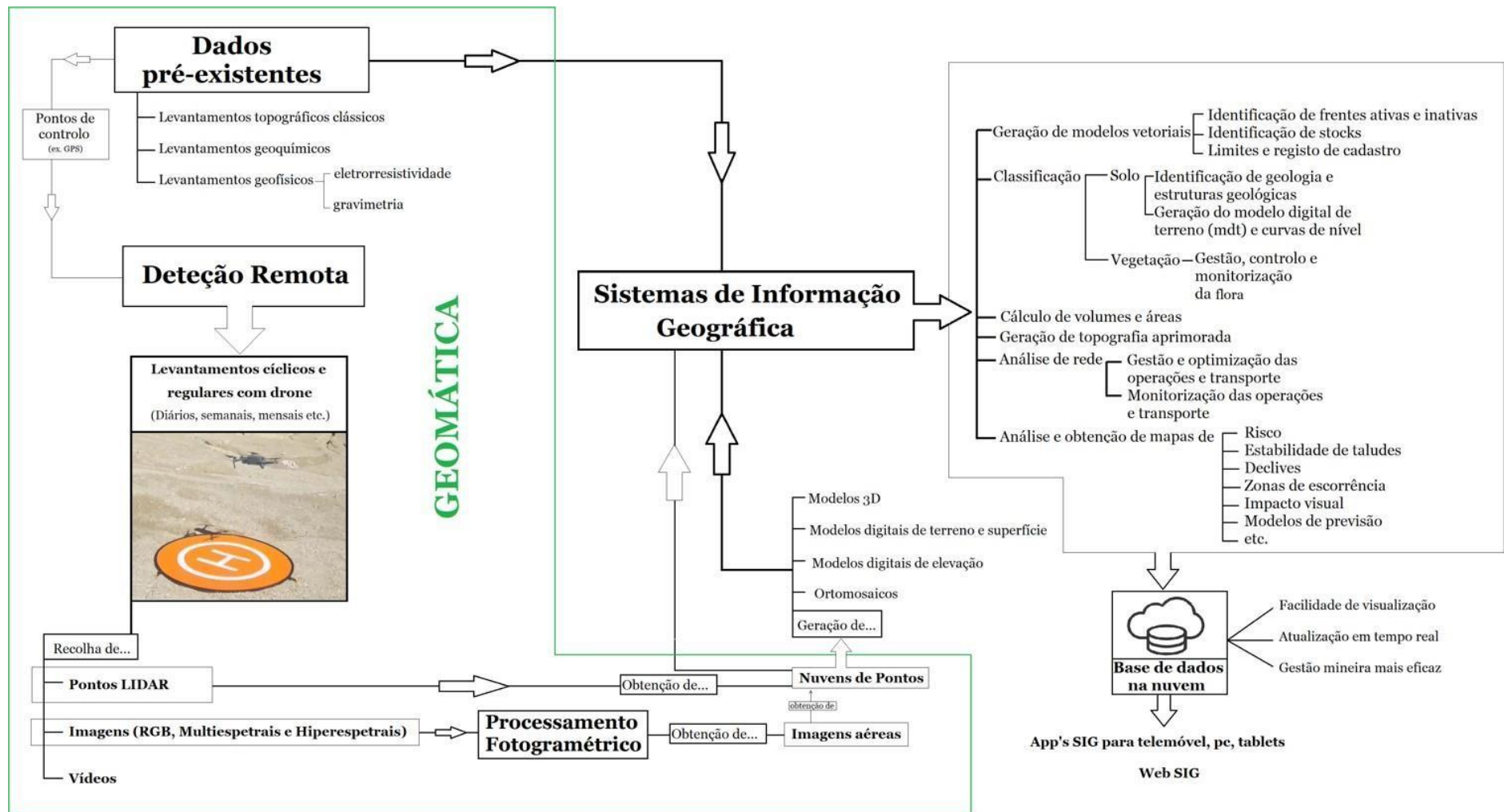


Figura 3.1: Metodologia proposta para um fluxo de trabalho no apoio à gestão mineira a céu aberto

É necessário, também, a identificação e recolha de pontos de controlo, por métodos topográficos tradicionais (ex. GPS) para auxiliar e aumentar o rigor dos levantamentos por deteção remota, pois os pontos de controlo permitem identificar nas imagens obtidas com o drone coordenadas conhecidas diminuindo os erros.

Ainda antes da fase de trabalho de campo, é imprescindível o planeamento do trabalho, ou seja, definir quais os objetivos, qual a área de trabalho, quais os tipos de dados que são necessários recolher e com que finalidade de modo a definir os parâmetros de levantamento com o drone, como o tipo de drone a utilizar, a resolução espacial, a resolução espectral e resolução temporal pretendida.

Se o objetivo do levantamento é apenas realizar uma inspeção geral da evolução do avanço da mina, ou analisar, por exemplo, a melhor localização para determinadas infraestruturas ou planejar, gerir e inspecionar as operações de desmonte, o que não implica a necessidade de visualização de grande pormenor, talvez não seja necessária uma resolução espacial tão grande, podendo o voo ocorrer a uma maior altura, com maior espaçamento entre duas imagens recolhidas e de forma mais rápida. Para este caso, talvez também não seja necessária uma grande resolução espectral, bastando, por exemplo, utilizar um sensor RGB no levantamento. Já em relação à resolução temporal, talvez seja interessante realizar levantamentos de forma mais regular (diária, várias vezes ao dia, semanal etc.) por exemplo, caso o objetivo seja:

- monitorizar os avanços da exploração, sendo útil para realizar cálculos expeditos de material recolhido, analisar se os objetivos e metas estão a ser cumpridos e se é necessário ajustar ou alterar o fluxo das operações;
- controlar diversas operações mineiras como o transporte de material ou operações de desmonte, principalmente com recurso a explosivos, gerindo e garantindo a segurança de todos os trabalhadores, sendo interessante, por exemplo, realizar uma monitorização destas operações em tempo real.

Por outro lado, se o objetivo é recolher informações a nível da geologia e estruturas como falhas, analisar a instabilidade de vertentes e taludes e todo o tipo de informações que necessitam de uma visualização de muitos e pequenos detalhes e pormenores, a resolução espacial tem de ser maior, ou seja, o voo terá de ser realizado a uma menor altura e com menor espaçamento entre duas imagens, de modo a permitir a captura de maior pormenor. No caso da resolução espectral, se o objetivo é monitorizar, por exemplo, pequenos movimentos de massas de modo a analisar a instabilidade das vertentes e taludes não é necessário uma grande resolução espectral, sendo suficiente utilizar sensores RGB, mas caso o objetivo seja recolher e analisar informações relativas à geologia e composição mineralógica, ou mesmo estudar o impacto que a mina tem na saúde da vegetação envolvente é necessário utilizar sensores que tenham a capacidade de distinguir características espectrais menores, principalmente nas gamas do NIR e VNIR a SWIR do

espectro eletromagnético, como os sensores LIDAR (para obtenção de dados na gama do NIR), multiespectral ou hiperespectral. A frequência de recolha de dados, neste caso, talvez não necessite de ser diária podendo ser, por exemplo, mensal, trimestral ou semestral.

Ao planear o voo é preciso ter em atenção qual a época sazonal, pois vai influenciar a hora em que o voo deve ser realizado de modo a garantir que a altura do sol é suficientemente elevada para que as sombras na imagem sejam mínimas. Diversos constrangimentos podem surgir também e implicar a realização ou não do voo, como os constrangimentos meteorológicos como a chuva, vento e neve.

Outra decisão em ter em conta, é o tipo de veículo aéreo não tripulado a ser utilizado. Por exemplo, para uma mina de grandes dimensões e com maior capital, talvez seja útil possuir um drone de asa fixa ou de asa rotativa como os multi-rotor, que apesar de terem um menor tempo de voo, são mais estáveis que os veículos de rotor único. O drone de asa fixa, que por norma, permite percorrer maiores distâncias durante um longo período de tempo, envolvendo uma maior cobertura, pode ser utilizado nos casos em que se pretende apenas fazer um levantamento geral da mina. Já um vant de asa rotativa é útil para realizar voos com maior detalhe e localizados, recolhendo dados mais precisos e tem a vantagem ainda, em relação aos drones de asa fixa, de ter VTOL, o que permite, por exemplo, realizar levantamentos de paredes verticais ou muito íngremes.

Por sua vez, numa mina de pequena a média dimensão, e com capital mais reduzido, um drone de asa rotativa, talvez seja o suficiente, pois não há necessidade de fazer cobertura de áreas muito extensas, para além de que é um tipo de drone muito acessível e de relativo baixo custo, existindo cada vez mais drones mais económicos e que apresentam boa qualidade e resolução.

Após definido os planos e parâmetros de voo segue-se então o trabalho de campo com a recolha dos dados com o drone, que podem ser fundamentalmente de dois tipos: imagens, quando utilizado drone com câmara RGB, multiespectral ou hiperespectral ou nuvem de pontos, quando utilizado drone com sensor LIDAR.

Com a recolha dos dados, no caso das imagens, já em trabalho de gabinete, e com recurso a um *software* de processamento de imagens, como o *Agisoft Metashape*, as imagens passam por um processo fotogramétrico que inclui as etapas de alinhamento e orientação das imagens aéreas e sobreposição das mesmas, sendo útil nesta etapa os pontos de controlo para assegurar o rigor do processo.

Findo o processo anterior, onde é gerado uma nuvem de pontos dispersos, a etapa seguinte consiste na geração da nuvem de pontos densa, a qual pode passar ainda por um processo de filtragem e “limpeza”, eliminando possíveis pontos *outlier*. Depois de processados os dados, podem então ser gerados o modelo digital de terreno (MDT), o modelo digital de superfície (MDS), modelos 3D e ortomosaicos, que podem ser produzidos

no mesmo *software* ou por exemplo no *software ArcGIS* (programas *ArcScene* ou *ArcMap*) para onde é importada a nuvem de pontos densa.

Pode ainda existir vantagens na realização da classificação da nuvem de pontos densa, pois a classificação permite, por exemplo, filtrar e eliminar a vegetação e edifícios, podendo ser útil para construir o MDT, gerar curvas de nível, construir mapas de declive, ou mesmo identificar estruturas geológicas sob a vegetação.

Por outro lado, pode ser importante manter a classe da vegetação para, através de ferramentas de SIG, monitorizar a vegetação ao longo do tempo, realizar análises NDVI, ou seja uma análise de medida do estado de saúde das plantas (sendo neste caso necessário um sensor multiespectral ou hiperespectral de modo a abranger para além da radiação vermelha, a radiação no infravermelho próximo do espectro eletromagnético) para estudar se a exploração mineira está ou não a ter impacto na flora envolvente, identificando áreas saudáveis e não saudáveis, identificar o tipo de flora existente para requalificação ambiental após o fim da exploração ou então ainda, como indicador do tipo de concentração mineral no solo, pois certas espécies de vegetação só se desenvolvem e predominam sobre solo com características mineralógicas específicas.

Com recurso às ferramentas SIG e com os dados obtidos pelos levantamentos com drone, conjuntamente com os dados pré-existentes que foram recolhidos logo no início do fluxo de trabalho, são construídos e obtidos diversos “*deliverables*” com fim a auxiliar a gestão mineira tornando-a mais eficiente e sustentável. De entre os vários produtos finais possíveis destaca-se:

- Dados vetoriais - linhas, polígonos ou pontos com informação contida, como por exemplo, polígonos que identificam os stocks contendo informação relativa ao volume, teores, data de extração e recolha, etc., polígonos que identificam frentes de exploração com informação relativa ao estado (ativa ou inativa), área, volume estimado, o tipo de material a ser extraído, a previsão de teor a ser extraído e realmente extraído, a quantidade e tipo de solo necessário para requalificar a área entre outros ou, ainda identificar e representar infraestruturas de apoio como armazéns e estradas, identificar e calcular massas de vegetação, etc. Com a informação relativa às estradas é possível também realizar análises de rede de modo a auxiliar a gestão do transporte de mercadoria e diminuir o tempo e custo das operações otimizando rotas;
- Dados matriciais – modelos digitais de elevação como o modelo digital de terreno e modelo digital de superfície, mapa de declives, ortomosaicos, mapa de aspeto (mapa que identifica a direção para a qual o declive se encontra voltado) etc.;
- Modelos tridimensionais – permite visualizar estruturas em 3D com grande pormenor inclusive realizar modelações em três dimensões (por exemplo modelar

e prever a extensão de determinado corpo de minério, a concentração de teores nas 3 dimensões do espaço, falhas etc.);

- Mapas topográficos aprimorados – novos mapas topográficos podem ser gerados com base em mapas obtidos por topografia convencional conjuntamente com novos dados obtidos com recurso à detecção remota, nomeadamente, melhorar o rigor dos limites, das curvas de nível etc.;
- Mapas de modelos de previsão – mapas de previsão de concentração e teores, mapas de resistividade e gravimetria, que podem ser aplicados em modelos 3D, auxiliando na gestão das operações e tomadas de decisão tanto na fase de prospeção como de exploração;
- Mapas de risco - identificar de forma antecipada mudanças na geometria e instabilidade dos taludes e zonas de perigo de deslizamento de terra ou zonas de subsidência, zonas de risco de inundação, etc.;
- Mapas de análise de impacto da mina - como mapas de visibilidade, mapas de poeiras, ruído entre outros, permitindo tentar encontrar soluções que diminuam os impactos negativos se necessário, respeitando a população envolvente e por consequente obtendo maior aprovação desta e menor descontentamento face à mina.

Por último, todos os dados, mapas e modelos obtidos podem ser continuamente armazenados e atualizados em base de dados, destacando-se as bases de dados em nuvem, pois permitem os responsáveis técnicos, através de plataformas de web SIG e aplicações SIG para telemóvel, computadores ou tablets, verificarem em tempo útil e em qualquer lugar a informação atualizada, facilitando o tempo de decisão, resposta e ação, permitindo ainda, atemporar as ações de remediação ambiental aquando do fim das operações mineiras.

Todo este fluxo de trabalho, por exemplo, numa pequena ou média empresa mineira a céu aberto, pode ser facilmente realizado por um ou dois técnicos especializados da empresa, não sendo necessário requisitar mão de obra exterior. Investindo na formação (utilização do drone e do *software* necessário) de um ou mais técnicos da empresa, na compra de um drone relativamente acessível e no investimento de um *software* de processamento dos dados e um *software* de SIG, o benefício a longo prazo é notável, pois os custos de mão de obra irão ser reduzidos, e a disponibilidade e a frequência com que se pode recolher dados irão ser muito maiores, refletindo-se na maior eficácia, redução de custos maior controlo das operações, avanços de exploração e riscos e impactos inerentes à atividade mineira e consequentemente tornando toda a gestão e logística mineira mais sustentável.

4 Caso de estudo

O caso de estudo teve como objetivo o estudo da aplicação da Metodologia de trabalho proposta no capítulo anterior, numa pequena mina a céu aberto, a Mina C-57 “Castanho” (Gonçalo, Guarda).

Foram seguidas quatro etapas principais (Figura 4.1):

- ✓ Fase de reconhecimento e enquadramento geográfico, geológico e histórico da área de estudo (Capítulo 4.1 Enquadramento da Mina C-57);
- ✓ Fase de planeamento e levantamento dos dados com recurso ao drone (Capítulo 4.2 Trabalho de campo);
- ✓ Fase de processamento dos dados com recurso a *software* de processamento fotogramétrico e fase de análise de resultados (Capítulo 4.3 Resultados e análises).



Figura 4.1: Etapas do caso de estudo

4.1 Enquadramento da Mina C-57

A Mina C-57 “Castanho” em Gonçalo (Guarda) (Figura 4.2) foi o local escolhido para a realização do caso de estudo, sendo o local onde foram efetuados os levantamentos com recurso ao drone.

Este capítulo pretende fazer um enquadramento geral da mina a nível geográfico, geológico e histórico.

A Mina C-57 “Castanho” pertence à pequena média empresa Pegmatítica- Sociedade de Pegmatites Lda., que explora, atualmente o depósito pegmatítico de Gonçalo, no distrito da Guarda (iTarg3T, 2021). É explorado essencialmente feldspatos litíferos para utilização na indústria cerâmica para reduzir o consumo de energia durante a produção dos materiais cerâmicos (Rodrigues, Antão, & Rodrigues, 2019).

A Pegmatítica- Sociedade de Pegmatites Lda., estabelecida em 1968 e sediada em Mangualde no distrito de Viseu, contém registos mais antigos da sua atividade que remontam ao ano de 1932 onde é referido o fornecimento de feldspato tradicional para porcelanas da china (Carolino, 2017).



Figura 4.2: Entrada da Mina C-57 “Castanho”, Gonçalo (Guarda)

Segundo Carolino (2017), a empresa segue quatro linhas principais de trabalho:

1. Exploração mineira, com planeamento e relatórios efetuados à entidade responsável pela exploração mineira nacional;
2. Projetos, principalmente em novas áreas para aplicação industrial de produtos químicos;
3. Treino de recém geólogos e engenheiros topográficos;
4. Interação com institutos politécnicos locais.

4.1.1 Enquadramento geográfico

A concessão da Mina C-57 “Castanho”, e com uma área aproximadamente de 0.91 km² (DGEG, 2021), encontra-se localizada na freguesia de Gonçalo, concelho e distrito da Guarda (Figura 4.3).

A freguesia de Gonçalo, situada numa das vertentes NE da Serra da Estrela e a aproximadamente 20 km da cidade da Guarda, tem uma área total de 27.10 km² e 1167 habitantes (1083 habitantes na vila de Gonçalo e 84 habitantes na aldeia de Seixo Amarelo), sendo uma localidade de baixa densidade populacional (43.1 habitantes/km²) (Freguesia de Gonçalo, 2020).

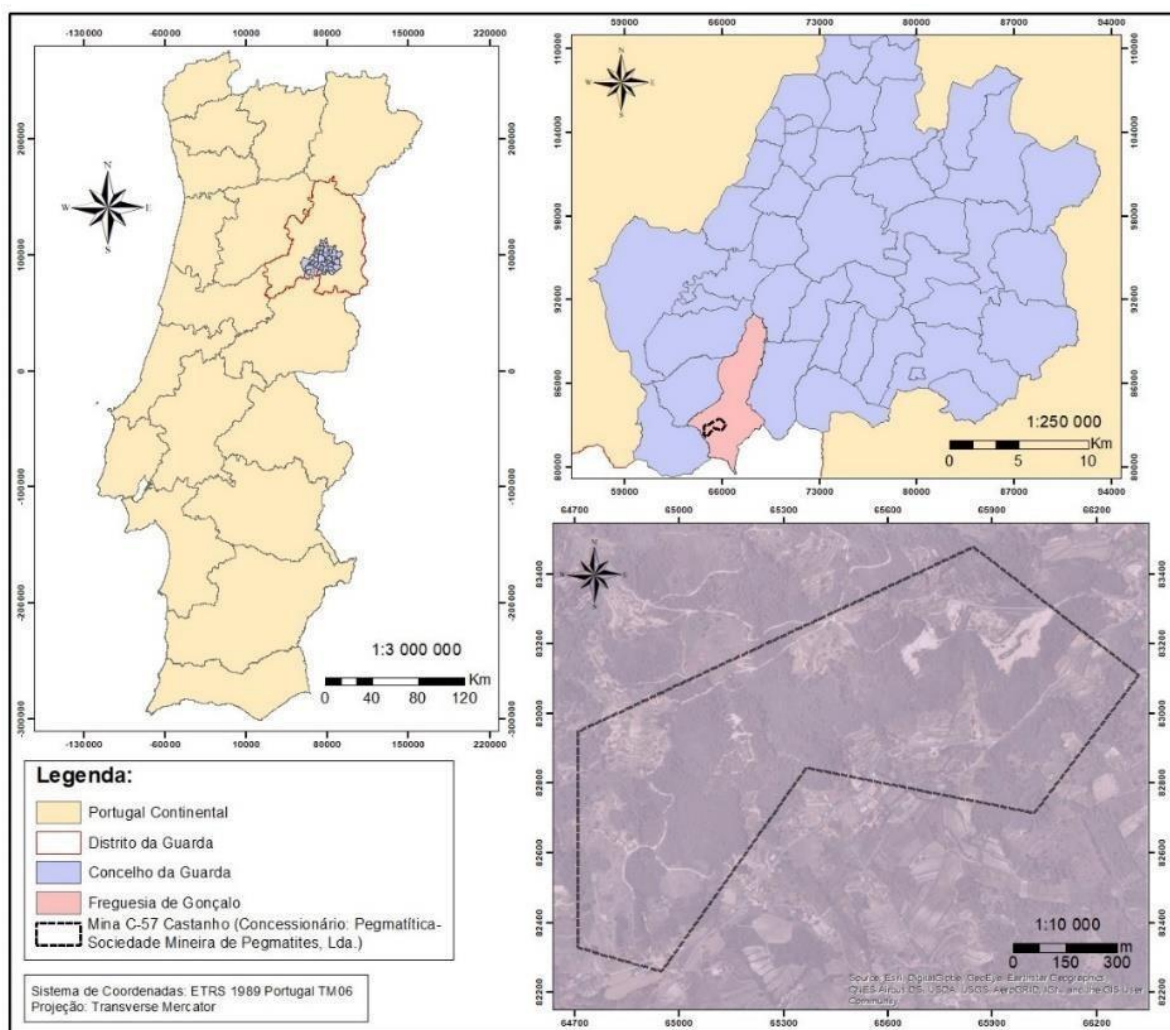


Figura 4.3: Enquadramento geográfico da Mina C-57

4.1.2 Enquadramento geológico

4.1.2.1 Enquadramento geral

A mina C-57 enquadra-se na unidade geotectónica Maciço Hercínico, mais concretamente na Zona Centro Ibérica (ZCI).

Segundo Ribeiro et al. (1979), a orogenia hercínica é acompanhada por um metamorfismo regional e magmatismo sin-orogénico, o qual este último é caracterizado pela produção abundante de granitóides que, do ponto de vista de composição e origem, pertencem a duas séries, uma série de granitóides “alcalinos” e aluminosos, formados principalmente durante a orogénese e extremamente controlados pelo metamorfismo regional, e uma série de granitóides “calco-alcalinos” e rochas básicas associadas, formadas após a orogénese.

A ZCI é, segundo Azevedo & Aguado (2013), “o segmento da Cadeia Varisca Europeia onde as rochas graníticas afloram em maior extensão e apresentam uma maior diversidade tipológica”, sendo nos terrenos autóctones da ZCI, no centro e norte de Portugal, onde aflora um batólito granítico, o Batólito das Beiras, que intrui metassedimentos, essencialmente metapelitos e metagrauvaques do “Complexo Xisto-Grauváquico”, com idades compreendidas entre o Proterozoico Superior a Câmbrico Inferior e o Carbónico Superior os quais são, de forma variada, afetados pela deformação hercínica polifásica D1 (com geração de dobras deitadas com clivagem de plano axial em regime tectonometamórfico dúctil na ZCI), D2 (com geração de cavalgamentos sub-horizontais de grande envergadura que laminam as estruturas anteriores) e D3 (com geração de dobras com planos axiais sub-verticais subparalelas ao Arco-Ibero-Armoricano) (Azevedo & Aguado, 2013; Ribeiro, 2013).

O conjunto de intrusões graníticas de idade hercínica ocorreu apenas em estádios relativamente tardios da orogenia, possuindo uma distribuição espacial que segue alinhamentos definidos que são o reflexo de zonas de cisalhamento dúctil associadas com a 3ª fase de deformação hercínica (D3), tendo Ferreira et al. (1987) segundo Azevedo & Aguado (2013), dividindo os granitóides em pré-orogénicos e granitóides sin-orogénicos, sendo, estes últimos, divididos em: ante-D3, sin-D3, tardi-D3 a tardi-pós-D3 e pós-D3 (Azevedo & Aguado, 2013; Farinha Ramos, 2010).

Conforme Mateus & Noronha (2010) os granitóides:

- a) Sin-D3 (320-310 Ma), são constituídos principalmente por granitos de duas micas fortemente peraluminosos com afinidade alumino-potássica e

representam a cristalização de magmas derivados de fusão parcial de metassedimentos pelíticos;

- b) Tardi-D3 (310-305 Ma), são constituídos por monzogranitos/ granodioritos biotíticos moderadamente peraluminosos e afinidade alumino-potássica resultantes da cristalização de magmas gerados por fusão parcial de materiais metagrauvacóides e/ ou meta-ígneos félsicos;
- c) Tardi-pós-D3 (300 Ma), são constituídos por leucogranitos peraluminosos de duas micas e franca afinidade alumino-potássica;
- d) Pós-D3 (296-290 Ma) são constituídos por granitóides de afinidade subalcalina ferro-potássica composicionalmente evoluídos resultantes de fusão parcial basical.

Segundo Azevedo & Aguado (2013), o Batólito das Beiras é distribuído por 4 séries principais (Figura 4.4):

- 1) Série dos granodioritos e granodioritos biotíticos sin-D3 precoces;
- 2) Série dos leucogranitos e granitos de duas micas, fortemente peraluminosos, sin-D3;
- 3) Série dos granitos biotíticos tardi-pós-D3 e rochas básicas associadas;
- 4) Série dos granitos biotíticos-moscovíticos tardi-pós-D3.

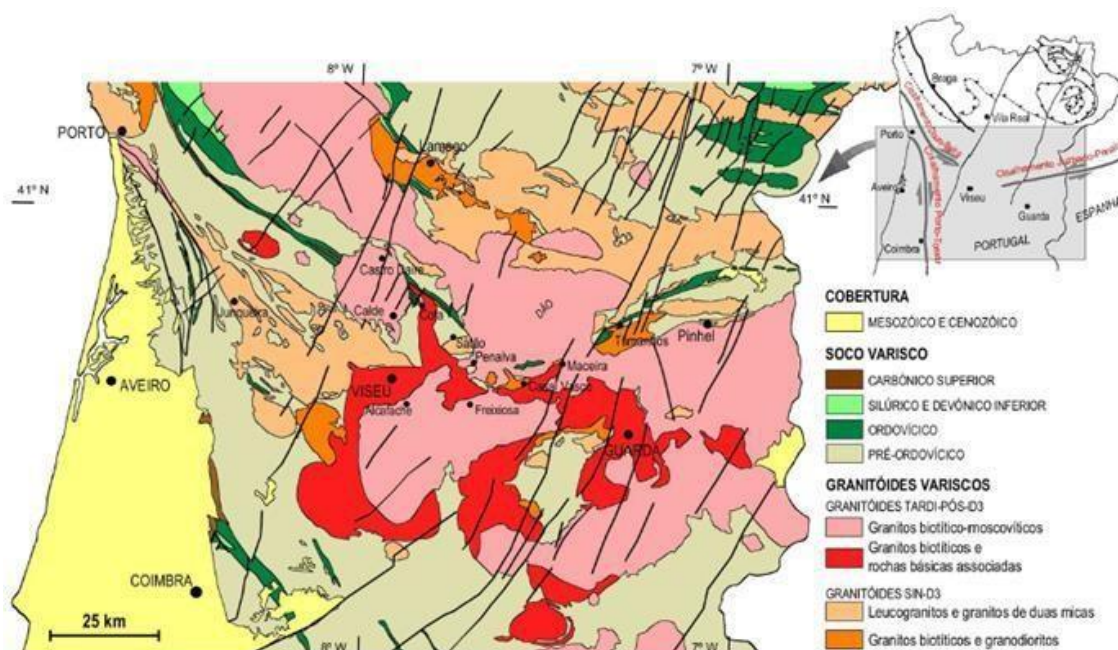


Figura 4.4: Esquema geológico simplificado do Batólito das Beiras (Azevedo & Aguado, 2013)

Na região Centro de Portugal, a Este, numa área superior a 100 km² entre Gouveia-Fornos de Algodres-Celorico da Beira-Belmonte-Sabugal, aflora um campo filoniano aplito-pegmatítico com mineralizações de metais raros onde ocorrem pegmatitos da família do tipo LCT (Li, Cs, Ta).

Este campo filoniano aplito-pegmatítico instalou-se num sistema de fraturas tardi-hercínicas (pós-D₃) predominantemente sub-horizontais, e resulta da sobreposição espacial de vários campos filonianos que estão preferencialmente encaixados em rochas granitóides de diversos tipos e, em casos raros, intruem formações metassedimentares. O campo filoniano é constituído principalmente por soleiras aplito-pegmatíticas em geral com espessura inferior a 3.5 m, não ultrapassando os 5 a 6 m, sendo os filões essencialmente constituídos por quartzo, feldspato potássico, albite e moscovite e os filões mais diferenciados lepidolite e minerais acessórios como berilo, turmalina, columbite-tantalite entre outros. (Farinha Ramos, 2010; Ramos, Bravo Silva, Neiva, & Gomes, 2006).

4.1.2.2 Enquadramento local

Na região de Gonçalo-Seixo Amarelo (Figura 4.5) aflora essencialmente granito porfiróide (Sin-D₃) (γπg), o granito da Guarda, sendo um granito do tipo monzonítico de duas micas, com predomínio da biotite sobre a moscovite, constituído por rochas leucomesocráticas, com grandes cristais de feldspato, predominando a fáceis com matriz de grão grosseiro a médio e contendo frequentemente inclusões e, algumas vezes, andaluzite e silimanite. (Quinta Ferreira & Antão, 2003; Ramos, Ribeiro, & Barriga, 1994; Teixeira et al., 1963).

Através ainda da análise da carta geológica 18-C (Guarda) 1:50 000 dos Serviços Geológicos de Portugal e segundo Teixeira et al. (1963), de E a SW de Gonçalo observa-se depósitos aluviareos (a), que se depositaram no vale da Gaia ao longo de uma grande extensão e que deram origem a importantes explorações mineiras (Couto mineiro da Gaia), a SW de Gonçalo observa-se pequenas zonas xistentas (Xz), do Complexo Xisto-Grauváquico ante-Ordovícico, a oeste de Gonçalo é possível encontrar granito não porfiróide de grão médio a fino (γπ'f), que apresenta limites bem definidos quer em relação aos xistos quer em relação aos granitos adjacentes e, observa-se ainda entre Gonçalo e Seixo Amarelo, inúmeras rochas filonianas como filões de quartzo (q), pequenas intrusões gabróicas (r), filões de rochas básicas metamorizadas (corneanas anfibolíticas) (δ'z) e zonas de filões e massas aplito-pegmatíticas (γap).

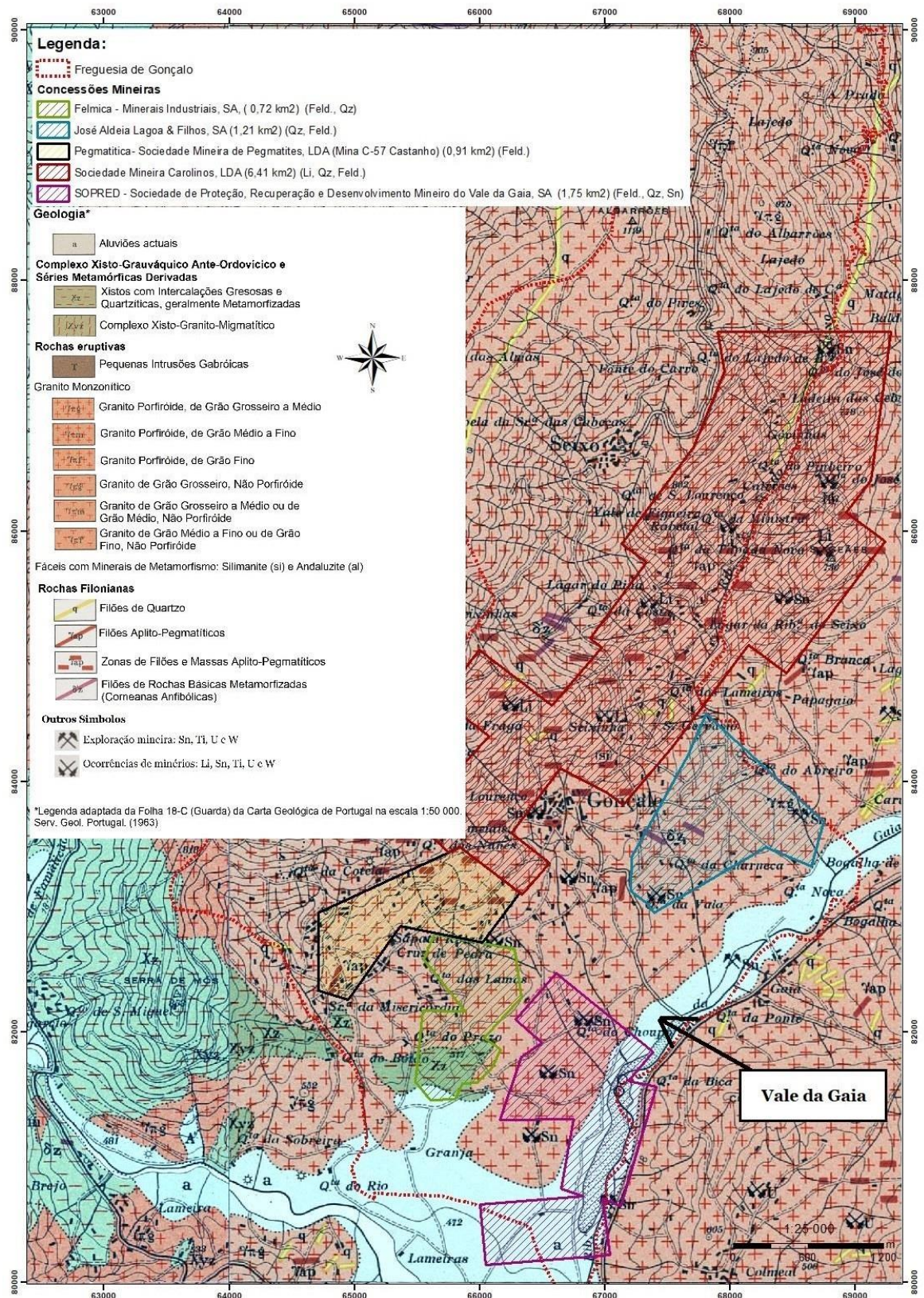


Figura 4.5: Enquadramento geológico da região de Gonçalo e Concessões Mineiras

As soleiras aplito-pegmatíticas mais diferenciadas e enriquecidas em Li e outros elementos raros afloram, na região de Gonçalo-Seixo Amarelo entre as cotas 400 m e 850 m e dividem-se em três grupos: soleiras estaníferas e soleiras litiníferas (Figura 4.6) e ainda soleiras mistas (Ramos et al., 2006).

Segundo Ramos et al. (1994), Ramos et al. (2006) e Ramos (2007):

- a) As soleiras litiníferas têm uma estrutura complexa, são em geral bandadas ou zonadas, de mineralogia mais complexa e ocupam as posições mais distais ou estruturalmente mais elevadas do campo filoniano. São caracterizadas por uma coloração clara mais ou menos arroxeada, de acordo com as percentagens de mica roxa litinífera, de quartzo leitoso e feldspatos (brancos a beges). Contém, de entre muitos minerais, quartzo, albite, feldspato-k, moscovite, moscovite litinífera, lepidolite, petalite, zinwaldite, amblygonite-montebrazite, columbite-tantalite, apatite, cassiterite etc. São enriquecidas em Al_2O_3 , MnO, P_2O_5 , Li, Rb, Nb, Ta etc. O granulado dos constituintes minerais é em regra grosseiro sendo possível distinguir as estruturas mineralizadas da rocha encaixante, em geral, o granito porfiróide biotítico (Granito da Guarda). O quartzo, a albite, o feldspato-K e a lepidolite formam em geral a fase pegmatítica que é envolvida e penetrada por uma fase aplítica tardia com lepidolite por vezes mais abundante à qual se associa quartzo e albite. A maior ou menor percentagem de lepidolite determina em geral os teores de Li os quais são genericamente elevados (teores médios de 5845 p.p.m.).
- b) As soleiras estaníferas têm uma estrutura e mineralogia mais simples, não são bandadas nem zonadas e ocupam em geral uma posição mais próxima às cúpulas graníticas ou estruturalmente mais baixa. São caracterizadas por uma cor bege clara, por vezes com leve tom rosado quando o feldspato-K se mostra rubificado. Contém quartzo, feldspato-K, albite, moscovite, amblygonite-montebrazite, moscovite ± litinífera, apatite, topázio, cassiterite, columbo-tantalite, berilo entre outros minerais e são enriquecidas em SiO_2 , K_2O , FeO, Sr, Ba, Sn etc. As soleiras estaníferas não apresentam em geral lepidolite de cor roxa, caracterizando-se pelos teores mais baixos em Li (teores médios de 1673 p.p.m.) e a estrutura do material que constitui as soleiras é por vezes semelhante à das soleiras litiníferas não zonadas com a fase pegmatítica quase sempre cortada e penetrada por uma fase aplítica tardia.

- c) As soleiras mistas fazem a transição entre os tipos de soleiras anteriores sendo similares às soleiras estaníferas e intruem em posições intermédias. Apresentam localmente pequenas concentrações de mica roxa litinífera e caracterizam-se por um teor intermédio de Li (teores médios de 2512 p.p.m.), podendo variar lateralmente enriquecendo localmente em mica litinífera.

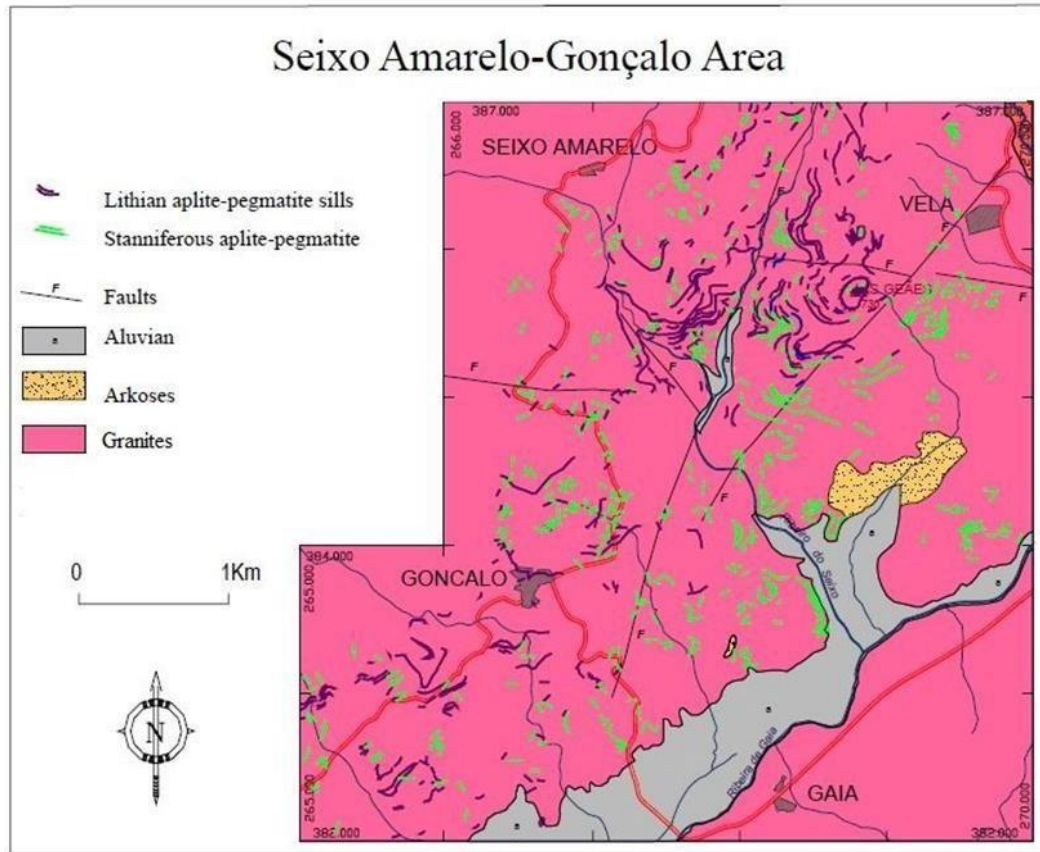


Figura 4.6: Mapa geológico das soleiras estaníferas e litiníferas de Seixo Amarelo-Gonçalo (Ramos, 2007)

Em Ramos & Noronha (1995), são distinguidos os seguintes episódios de mineralização:

- Episódio I: Caracterizado por minerais (quartzo, albite, moscovite, feldspato-k, apatite e turmalina) que ocorrem nas estreitas orlas aplíticas, nem sempre presentes, que compõem os encostos de teto e muro das soleiras;
- Episódio II: Dominantemente potássico com feldspato-k, berilo, petalite, amblygonite, quartzo, moscovite, apatite e albite e numa fase mais tardia topázio e em casos raros espodumena;
- Episódio III: Dominantemente sódico com columbo-tantalite, cassiterite, turmalina, albite, zircão, quartzo, moscovite, topázio e em fase mais tardia microlite;
- Episódio IV: Sodalítico com textura pegmatítica com albite, lepidolite, quartzo e moscovite;

- Episódio V: Dominantemente litinífero com textura aplítica e caracterizado pela presença de lepidolite fina associada com alguma albite, quartzo e moscovite litinífera;
- Episódio VI: Presença de lepidolite submicroscópica, quartzo zonado, albite, micas verdes, fosfatos hidratados de Al, Fe e Mn e sericite.

4.1.3 Enquadramento histórico da exploração mineira no Vale da Gaia

O Vale da Gaia (Figura 4.5 e Figura 4.7), estende-se no limiar dos concelhos de Belmonte e Guarda, sendo visível na região de Gonçalo ainda resquícios da exploração de estanho neste vale.

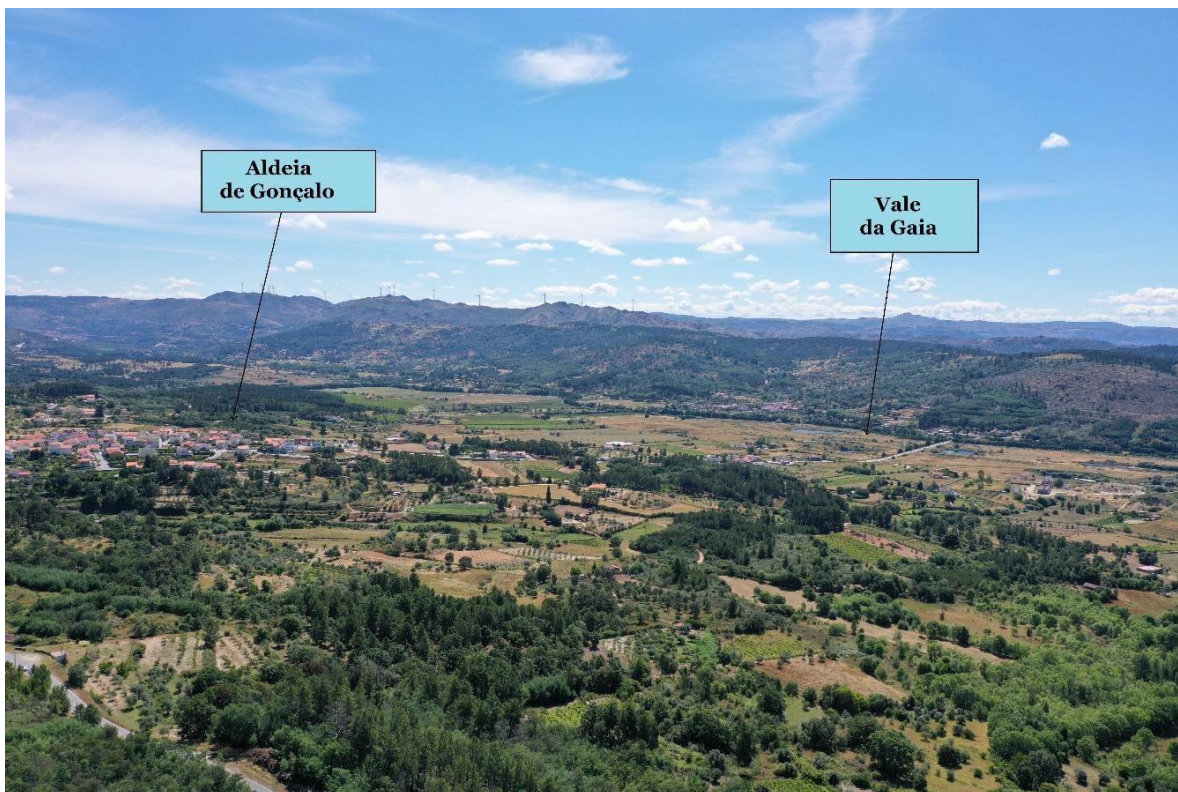


Figura 4.7: Aldeia de Gonçalo e Vale da Gaia, vista de W-E (Foto Prof. Dr. Pedro Almeida)

No início do século XX, mais concretamente no ano 1914, a empresa *The Portuguese American Tin Company* (PATC), uma pequena empresa com cerca de 80 a 100 funcionários e técnicos dirigentes efetivos, dá início à atividade extrativa no Vale da Gaia com recurso a uma draga mecânica (Figura 4.8), explorando de forma industrial estanho (Silva, 2010).

Entre o período de 1914 e 1949, a companhia praticamente explorou toda a extensão do vale da ribeira de Gaia, ocorrendo a destruição das culturas, sistemas de irrigação e coberto vegetal, alterando a composição do solo tornando-o estéril até aos anos 70 (Silva, 2016).



Figura 4.8: Draga no Vale da Gaia nos anos 70 (José Leal da Costa in Silva, 2016)

Depois do desmantelamento da empresa PATC, que encerra a sua atividade em 1962 após a exploração mineira, na década de 50, de áreas adjacentes ao Vale da Gaia, uma nova empresa surge com capitais portugueses e brasileiros, a empresa Dramin, a qual tinha a intenção de reativar a exploração de estanho no Vale da Gaia, redragando as parcelas já anteriormente exploradas pela companhia PATC (Silva, 2010).

Em 1974 a Dramin começa a aproximar a sua atividade em parcelas ainda não exploradas contíguas às habitações, surgindo em 1974 o movimento anti dragagem da Gaia, com fim a impedir a exploração mineira dessas mesmas parcelas (Silva, 2010, 2016).

O movimento teve o seu ponto alto nos finais de 1974 e nos primeiros 3 trimestres de 1975, mas em 1980, os proprietários das parcelas com receio por não terem suporte legal e verem a possibilidade de expropriação das suas terras por utilidade pública, decidiram aceitar os termos resultantes de negociação com a Dramin, acabando os terrenos por serem dragados (Silva, 2016).

Atualmente a freguesia de Gonçalo conta com a presença de cinco concessões mineiras (Figura 4.5) onde é explorado maioritariamente feldspatos, quartzo e em menor número lítio, sendo que a área da concessão mineira SOPRED- Sociedade de Proteção, Recuperação e Desenvolvimento Mineiro do Vale da Gaia, S.A, abrange parte do Vale da Gaia, explorando feldspatos, quartzo e estanho (DGEG, 2021).

4.2 Trabalho de campo

A componente de campo do trabalho, consistiu no levantamento aéreo, com recurso a um Drone, de imagens da Mina C-57 “Castanho”, imagens essas, passíveis de processamento fotogramétrico para posterior integração em ambiente SIG, a fim de realizar diversas análises e obter diferentes produtos finais que auxiliem a tomada de decisão e gestão mineira.

Previamente, foram fornecidos alguns dados e mapas, em formato pdf, pela CEO da mina, a geóloga Alexandra Carolino. Como alguns dados são de carácter confidencial, o uso dos mesmos foi limitado e apenas alguns mapas topográficos foram transferidos para uma plataforma SIG. Após os mapas terem sido importados para a plataforma SIG, estes foram georreferenciados para servirem de base e apoio para este trabalho, sendo posteriormente utilizados para sobrepor aos dados recolhidos pelo drone e gerar mapas topográficos mais aprimorados.

Antes da realização do voo com o drone foram definidos alguns parâmetros para o voo, de entre os quais, o tipo de drone a utilizar, a área a sobrevoar, o dia e a hora, a altura de voo, o ângulo da câmara, tipo de voo etc.

Os levantamentos foram realizados utilizando o drone multi-rotor *DJI Mavic Pro 2* (Figura 4.9), mostrando a Tabela 4.1 algumas das características do equipamento. Foi escolhido este drone para analisar se um equipamento relativamente acessível permite obter bons resultados numa área pequena a média, como o caso em estudo, para além de que o drone multi-rotor tem vantagens em relação a outros tipos, como o fato de ser mais acessível, de fácil manejo, permitir um bom controlo sobre a posição e enquadramento de voo e possibilitar uma decolagem e aterragem vertical, não sendo necessário uma área longa plana para servir de pista, permitindo voos em zona de montanha, com taludes próximos da vertical e operar em espaços reduzidos, com no caso em estudo que se encontra rodeado por vegetação arbórea.



Figura 4.9: Drone DJI Mavic Pro 2

Tabela 4.1: Características do drone DJI Mavic Pro 2 (Adaptado de DJI, 2021)

Peso do aparelho	907 g
Sensor	1" CMOS
Velocidade máxima	≈ 77 km/h
Tempo máximo de voo	≈ 31 min. (a uma velocidade ≈40km/h)
GNSS	GPS+GLONASS
Resolução	5472 x 3648
FOV	≈ 77°

No dia 23 de Junho de 2021 foram efetuados três levantamentos (Tabela 4.2) a altitudes diferentes, ocorrendo todos os voos em piloto automático e as imagens captadas com um ponto de vista obliquo de -70° com a horizontal.

Tabela 4.2: Duração, altitude e n° de fotos para cada levantamento

	Duração do voo	Altura do voo média	Área de voo	N° de fotos obtidas	Resolução (*)
1° levantamento	≈ 16 min.	35 m	15 475 m ²	350	8.4 mm/pixel
2° levantamento	≈ 17 min.	45 m	25 700 m ²	267	1 cm/pixel
3° levantamento	≈ 25 min.	100 m	208 000 m ²	394	2.4 cm/pixel
(*) Melhor resolução teórica possível (cálculos para um FOV horizontal de 65,5°)					

Os levantamentos foram realizados no período da manhã aproximadamente entre as 9h e as 10h de modo a existir luz solar suficientemente alta para minimizar as zonas de sombra originadas por uma iluminação demasiado rasante obtendo, assim, a melhor exposição solar.

A Figura 4.10 mostra as áreas de levantamento para cada voo e um mapa que ilustra a posição da câmara e respetivo número de sobreposição de imagem.

Os dois primeiros voos foram realizados a uma menor altura (35 m e 45 m respetivamente) com o intuito de obter imagens com maior resolução captando maior quantidade de pormenores, principalmente, das frentes de exploração da mina (Figura 4.11).

No terceiro voo, realizado a uma maior altura (100 m), foram captadas imagens com menor resolução pois o objetivo foi o de captar a extensão da concessão mineira como um todo (Figura 4.12).

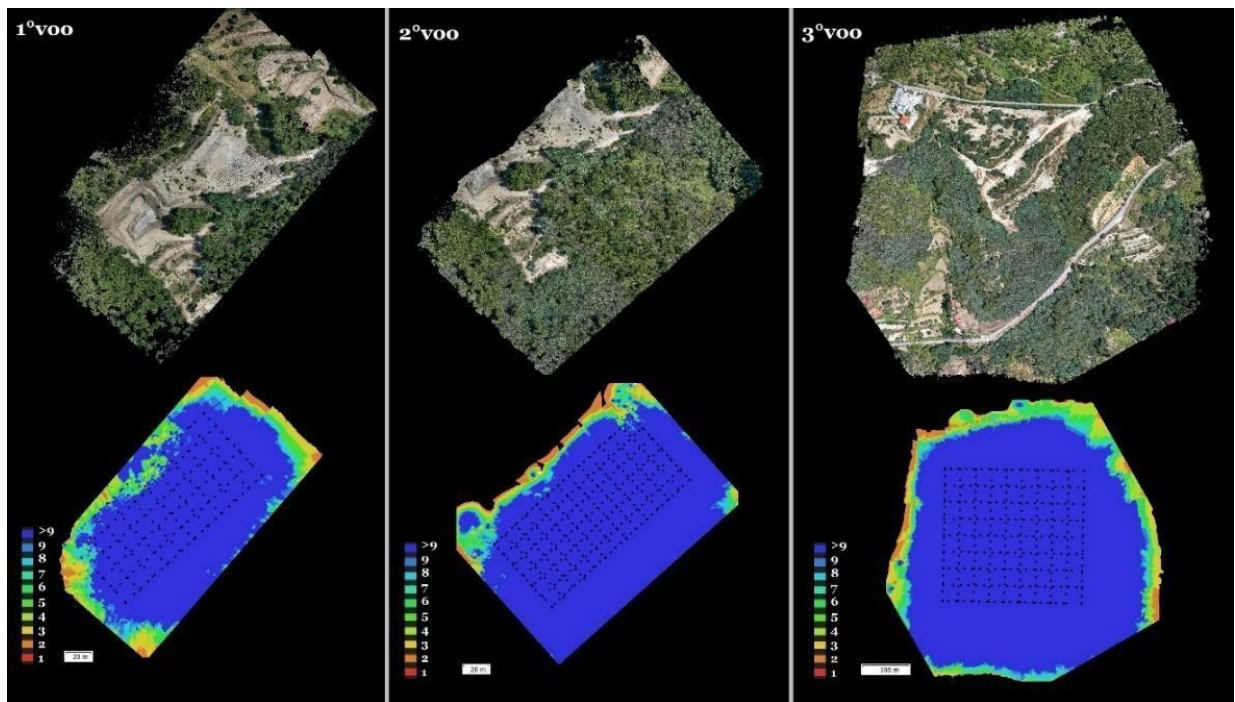


Figura 4.10: Levantamentos com drone e localizações da câmara e número de densidade de imagens



Figura 4.11: Frentes da mina, vista de SE para NW (Imagem: Pedro Almeida)



Figura 4.12: Perspetiva geral da Mina C-57, vista E para W (Fotograma de vídeo: Pedro Almeida)

4.3 Resultados e análises

4.3.1 Tratamento dos dados

Após a recolha de imagens com o drone procedeu-se ao processamento dos dados em gabinete. O processamento dos dados, realizado no *software Agisoft Metashape*, envolveu diversas etapas de entre as quais:

- ✓ 1ª etapa: Alinhamento das imagens (Figura 4.13) – nesta fase, o *software* encontra a posição da câmara e orientação para cada imagem e constrói um modelo de nuvem de pontos dispersos (Agisoft LLC, 2019), ou seja, pontos equivalentes em diferentes imagens e que permitem posicionar a malha de imagens e proceder posteriormente à reconstituição do modelado das diferentes superfícies.
- ✓ 2ª etapa: Criação da nuvem de pontos densa (Figura 4.14) – nesta fase, o *software*, com base nas posições estimadas da câmara, calcula as informações de profundidade para cada câmara, para serem combinadas numa única nuvem de pontos densa (Agisoft LLC, 2019), pontos esses, que estão georreferenciados e refletem já a posição das superfícies refletoras e incluem a resposta cromática das mesmas, podendo serem visualizados como formas tridimensionais. A nuvem de pontos densa pode ser utilizada para processamentos como a geração de modelos 3D e DEM.

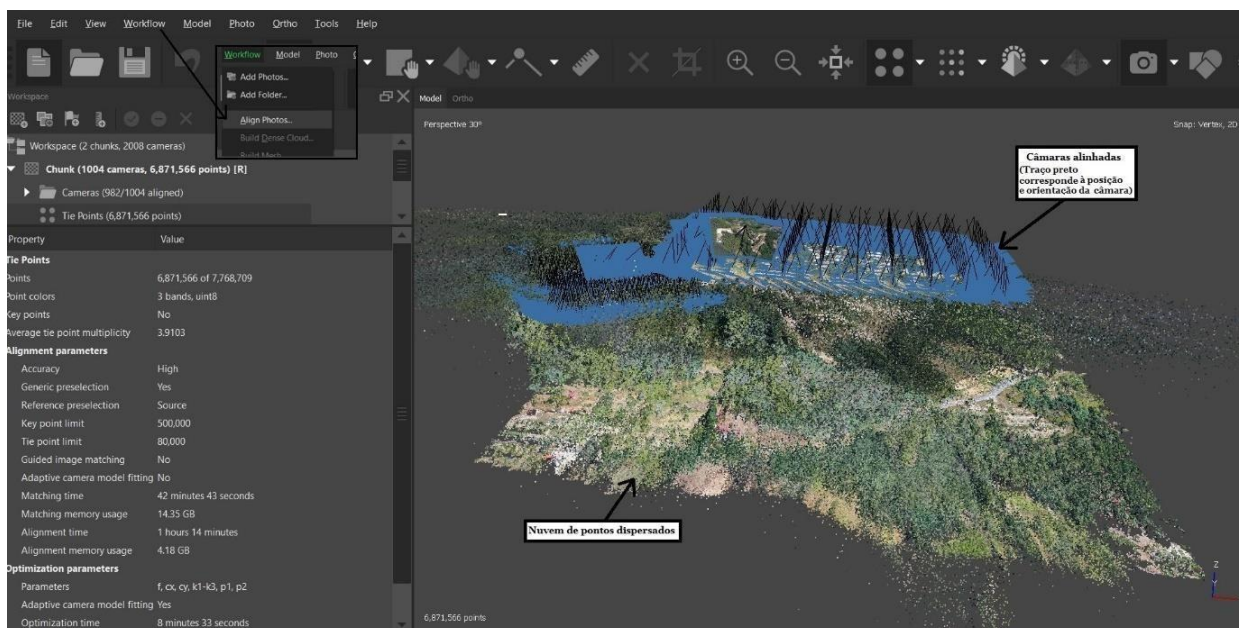


Figura 4.13: 1ª etapa do processamento: Alinhamento das fotos

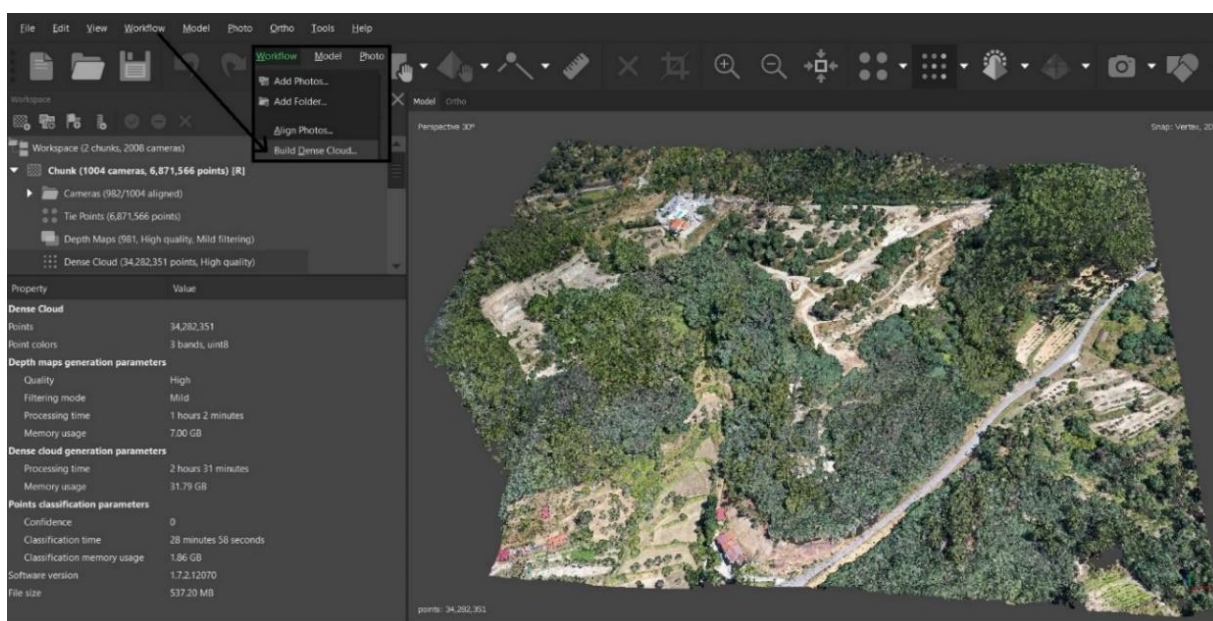


Figura 4.14: 2ª etapa do processamento: Geração da nuvem de pontos densa

✓ 3ª etapa: Criação de Modelos 3D, ortomosaicos e DEM

- Modelos 3D – Com base nas informações da nuvem de pontos, o programa reconstrói um modelo poligonal, uma malha (*mesh*) (Figura 4.15). É possível também construir um modelo 3D que permite visualizar grandes áreas em alta resolução, o designado *Tiled Model*, que em comparação com a *mesh* permite a visualização de maior detalhe (Figura 4.16). O programa permite visualizar os Modelos 3D em três tipos de visualização (Figura 4.15): modelo

sombreado, modelo sólido e modelo *wireframe* (modelo onde apenas estão representados linhas e vértices).

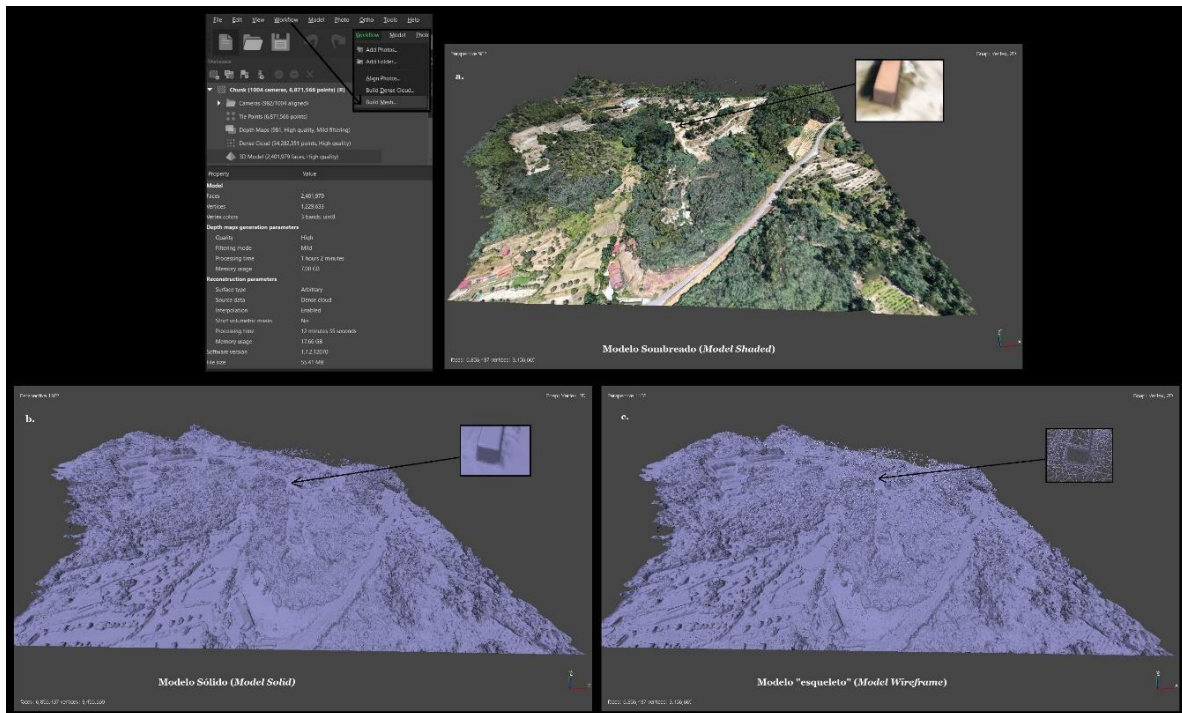


Figura 4.15: Geração de Modelo 3D - *Mesh* (Tipo de visualização: *Model Shaded* (a), *Model Solid* (b), *Model Wireframe* (c))

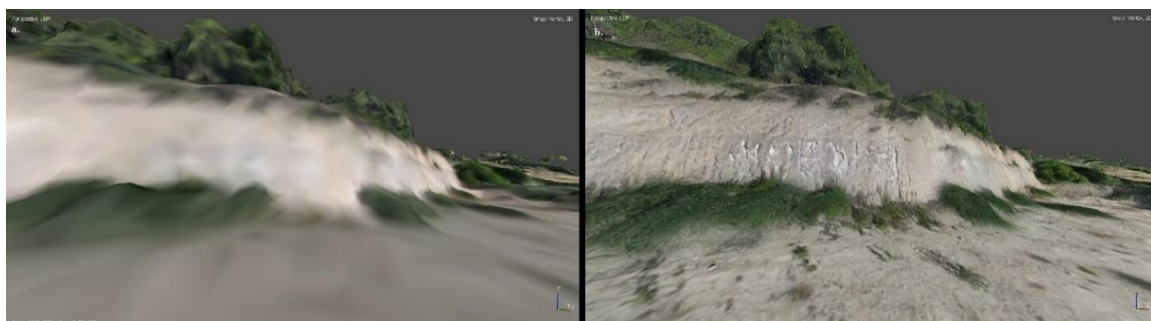


Figura 4.16: Modelos 3D - *Mesh* (a) vs. *Tiled Model* (b)

- Modelo Digital de Elevação (DEM) – o programa permite representar um modelo digital de elevação, com uma rede regular de valores de altura, rasterizado a partir da nuvem de pontos ou da *mesh*, sendo os resultados mais precisos quando calculados com base na nuvem de pontos densa (Agisoft LLC, 2019).
 - Foram então gerados dois DEM a partir da nuvem de pontos densa. O primeiro DEM, o MDS (modelo digital de superfície) foi gerado sem eliminação da vegetação resultando em valores de cotas que variam entre os 556 m e os 709 m (Figura 4.17).

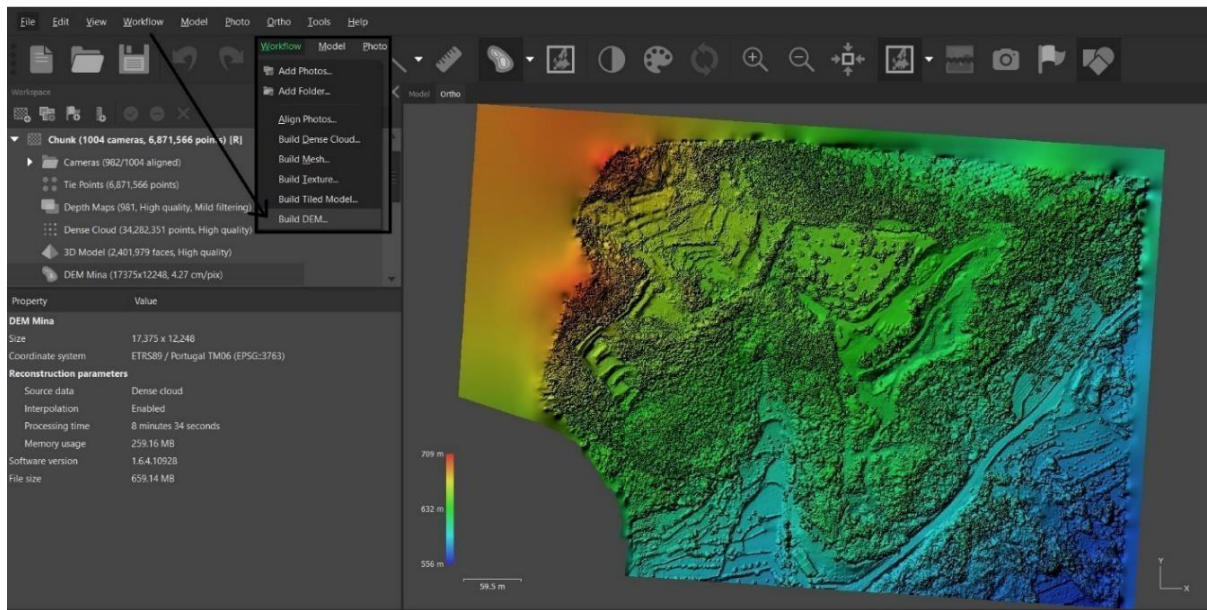


Figura 4.17: Modelo Digital de Elevação (com vegetação)

- Para gerar o segundo DEM, o MDT (modelo digital de terreno) (Figura 4.20) só com a classe correspondente ao nível do terreno procedeu-se em primeiro lugar à classificação automática do solo e vegetação (Figura 4.18).

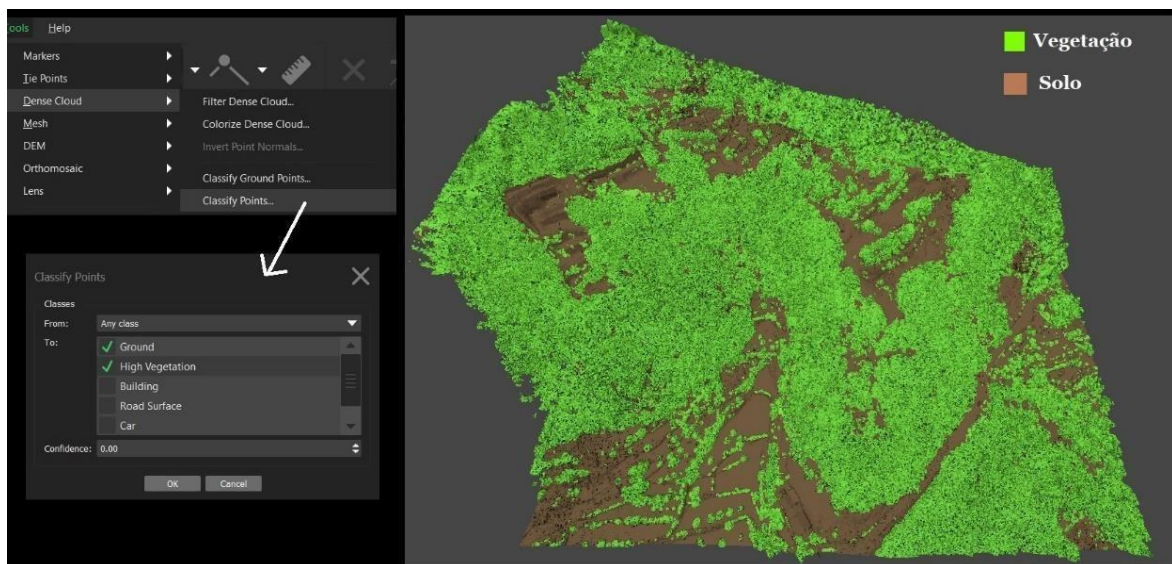


Figura 4.18: Classificação automática da nuvem de pontos em classes vegetação e solo

- Como ao realizar a classificação automática da classe vegetação e solo o programa assume os edifícios como solo, reclassificou-se os edifícios manualmente para corresponderem à classe dos edifícios e ainda uma retroescavadora como classe dos veículos.

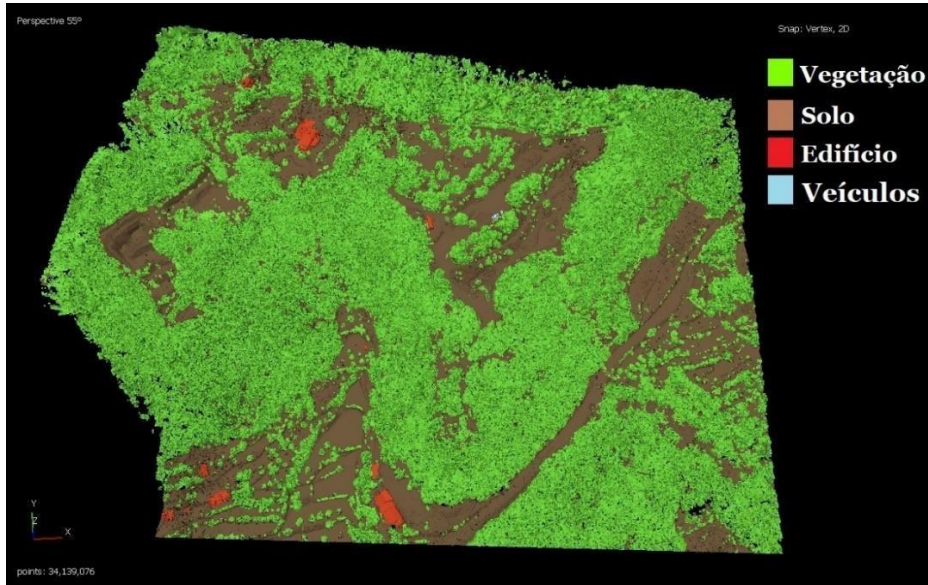


Figura 4.19: Classificação manual dos edifícios e viatura

- Após a geração do MDT onde foram obtidos valores de cotas entre os 556 m e 697 m, foi ainda gerado, através da opção “*Tools – Generate Contours*”, e utilizando o MDT, as linhas de contorno representando as cotas com equidistância de 5 e 1 m (Figura 4.21).

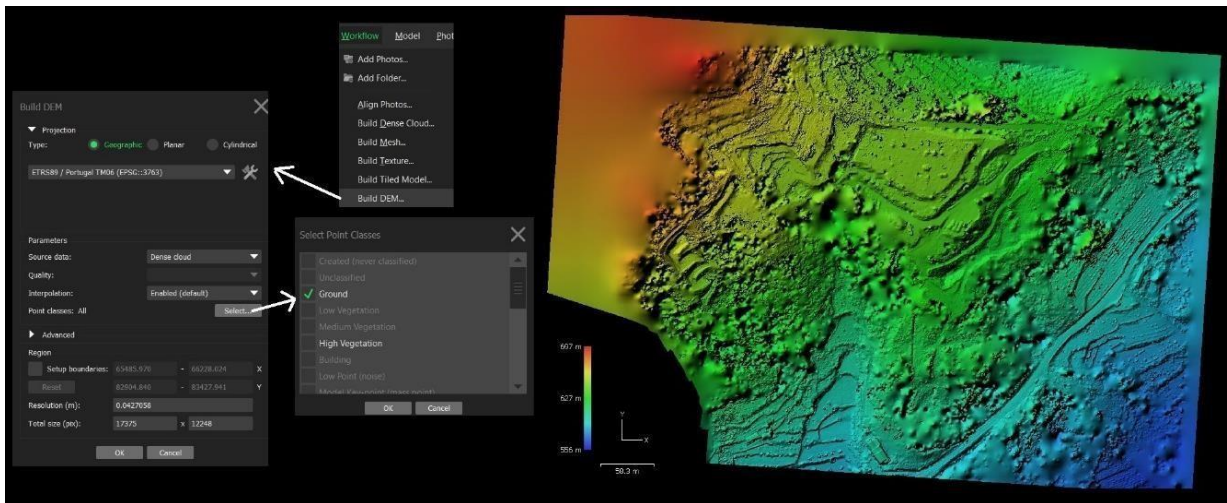


Figura 4.20: Modelo Digital de Terreno

- Ortomosaico – o programa permite a construção de ortomosaicos, que podem ser utilizados, por exemplo, para uma visão detalhada de um objeto. Foi construído um ortomosaico com base na *mesh* (Figura 4.22).

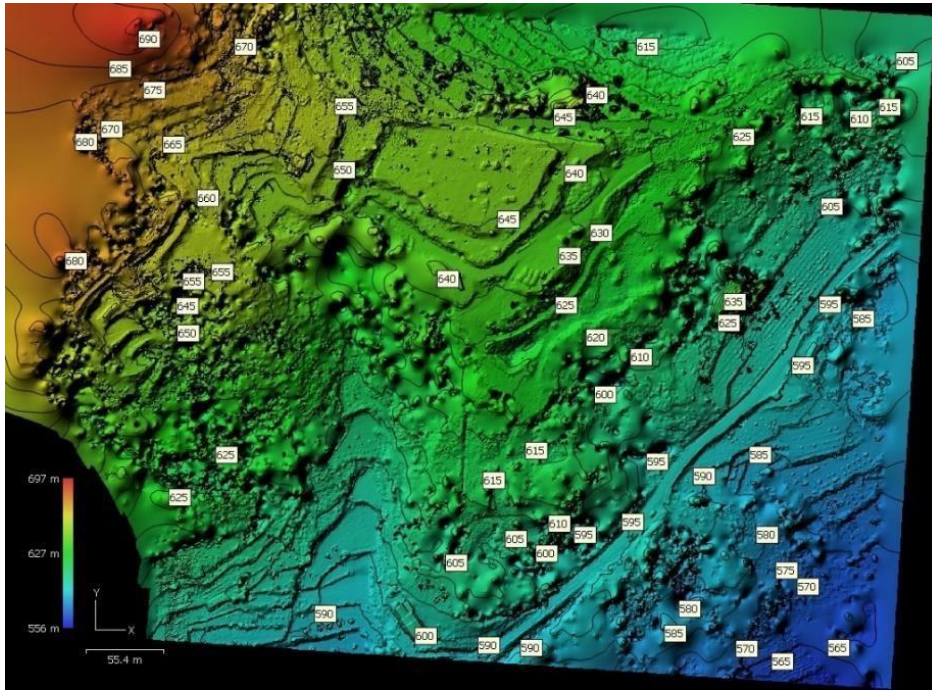


Figura 4.21: Linhas de contorno

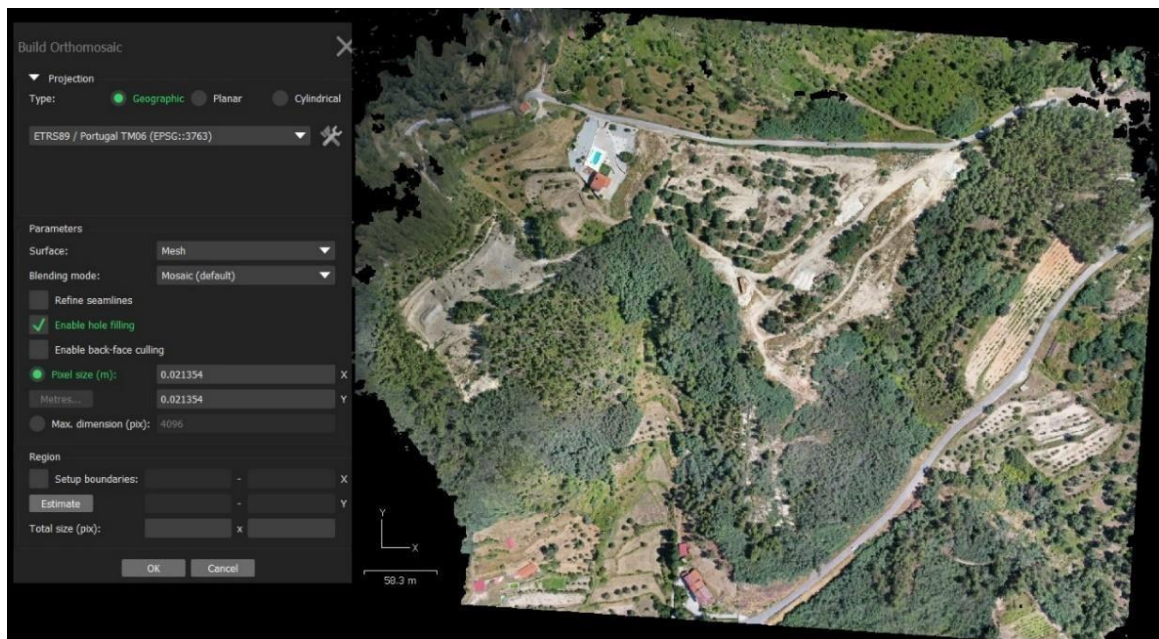


Figura 4.22: Ortomosaico

A fase de processamento dos dados com a construção dos respetivos modelos 3D, DEM's e ortomosaico é um processo que em média, num computador básico pessoal e para um projeto desta dimensão, demora aproximadamente 1 dia a ser concluído (Tabela 4.3), podendo o tempo ser consideravelmente reduzido utilizando um *hardware* adequado.

Tabela 4.3: Duração e parâmetros para os diversos processamentos

Procedimento		Duração aproximada (*)	Parâmetros
Alinhamento das fotos		2 horas	- Precisão alta
Geração da nuvem de pontos densa		4 horas	- Qualidade alta - Filtragem média
Modelos 3D	<i>Mesh</i>	1 hora 14 minutos	- Qualidade alta - Filtragem média - Obtido a partir da nuvem de pontos densa - 2 401 979 faces
	<i>Tiled Model</i>	15 horas 18 minutos	- Qualidade alta - Filtragem média - Obtido a partir da nuvem de pontos densa - Contagem de faces alta - Resolução de 2.14 cm/pixel
Modelo Digital de Elevação	MDS	8 minutos	- Com interpolação - Obtido a partir da nuvem de pontos densa - Resolução de 4.27 cm/pixel
	MDT	6 minutos	
Ortomosaico		16 minutos	- Obtido a partir da <i>mesh</i> - Com preenchimento de vazios - Resolução de 5 cm/pixel
(*) Duração aproximada para um computador com as seguintes características: Processador Intel(R) Core (TM) i3-10110U, CPU 2.10GHz - 2.59 GHz & RAM 8 Gb			

O *software Agisoft Metashape* tem a vantagem de permitir que o utilizador escolha a opção de o programa ir efetuando todos os processos de forma automática e à medida que for finalizando gravar automaticamente, permitindo, por exemplo, deixar o programa a correr fora da hora de expediente. De frisar, no entanto, que não é necessário percorrer todos os passos sequencialmente, podendo, alguns, serem obtidos fora da sequência apresentada.

Após o processamento dos dados e da obtenção de alguns produtos como os modelos 3D, DEM's e ortomosaicos estes foram utilizados para gerar outro tipo de produtos finais como cálculo de volumes de stocks, mapa de declives, mapas de visibilidade e outros mapas cartográficos.

4.3.2 Determinação de volumes

Utilizando ainda o *software Agisoft Metashape*, uma das primeiras análises realizadas foi o cálculo de diversos volumes de material extraído, seguindo um conjunto de passos que envolveram recorte da área de interesse na nuvem densa de pontos, seguido da geração do modelo 3D do material já isolado e posterior fecho da *mesh* de modo a ser

possível calcular o volume e área da superfície, através da ferramenta “*Tools – Mesh – Measure Area and Volume*”.

Na primeira porção de material (Figura 4.23) foi obtido um volume de 119,12 m³ e 405,35 m² de área de superfície 3D.

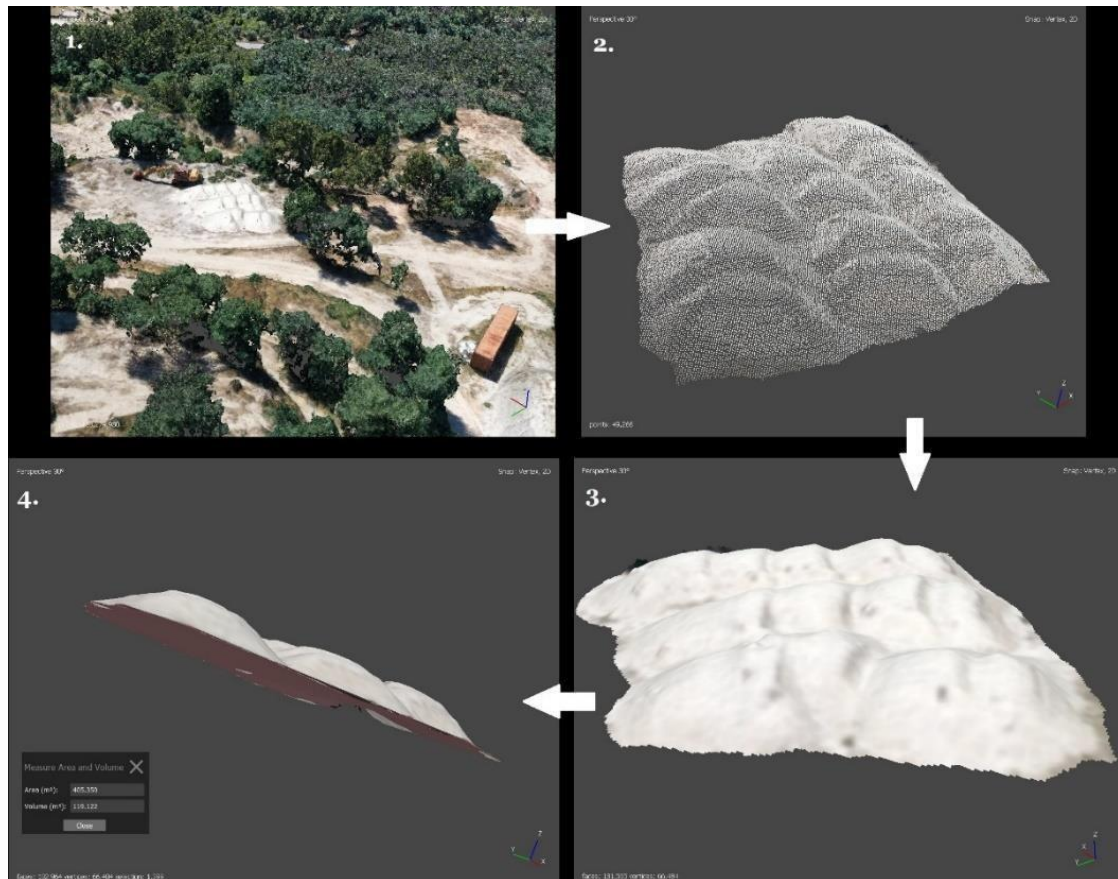


Figura 4.23: Cálculo de volume I - Recorte da zona da nuvem para isolamento do stock (1., 2.), geração da *mesh* (3) e fecho da malha para cálculo de volume (4.)

No segundo stock (Figura 4.24) foi obtido um volume de 161,92 m³ e uma área de 729,02 m².

Como a grande quantidade de polígonos (ou faces) numa *mesh* pode tornar os processamentos muito pesados e demorosos, pretendeu-se analisar até que ponto era possível simplificar a *mesh*, ou seja, reduzir o número de faces, e manter fiável o cálculo do volume e área.

Deste modo através da ferramenta “*Tools-Mesh-Decimate*”, foi-se reduzindo o número de faces da *mesh* correspondente ao stock 2, e foi registado os respetivos volumes e áreas do stock (Tabela 4.4).

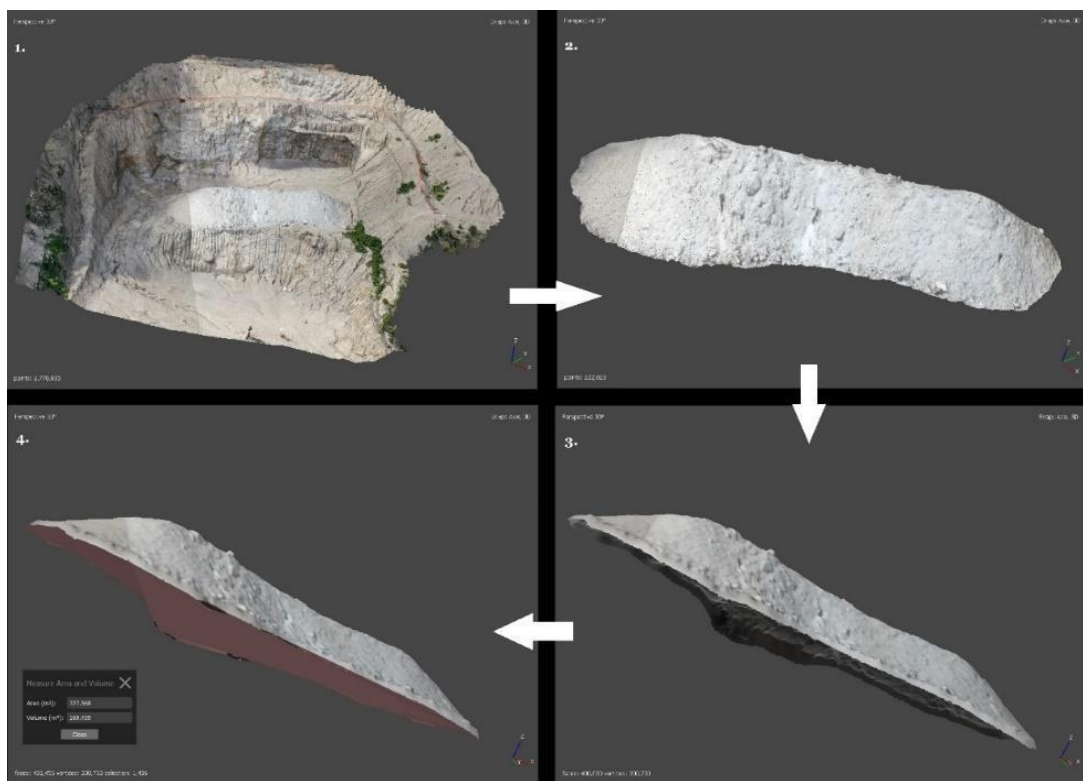


Figura 4.24: Cálculo de volume II- Recorte da zona da nuvem para isolamento do stock (1., 2.), geração da *mesh* (3) e fecho da malha para cálculo de volume (4.)

Tabela 4.4: Número de faces vs. volume e área para o stock 2

Nº de faces	Volume (m3)	Área (m2)
3524968	161,919	792,017
2000000	161,919	787,18
1000000	161,918	777,484
500000	161,916	768,046
250000	161,91	758,424
125000	161,904	744,656
60000	161,907	735,322
30000	161,801	699,139
15000	161,776	642,562
7500	161,921	568,113
4000	161,851	441,482
2000	161,758	381,763
1000	161,656	358,129
500	161,74	373,706
250	161,287	363,6
124	159,213	353,782

Com base na tabela anterior e no Gráfico 4.1 é possível verificar que, para o volume em estudo, só a partir das 60 000 faces é que o cálculo do volume e da área deixam ser fiáveis, isto é, é possível diminuir aproximadamente 98% do número de polígonos, ou seja, reduzir dos $\approx 21\,770$ polígonos/m³ para 371 polígonos/ m³.

A nível do aspeto visual do modelo 3D (Figura 4.25) é possível constatar que mesmo reduzindo, por exemplo, das 3 524 968 faces (21 770 polígonos/m³) para as 125 000 faces

(772 polígonos/ m³) (uma redução de ≈96% do n° de polígonos) a mudança na aparência do modelo não é muito perceptível a olho nu, ainda sendo possível visualizar bastante pormenor. A maior mudança do aspeto, com perda do pormenor, dá-se sensivelmente a partir das 15 000 faces (93 polígonos/ m³), ou seja, uma redução ≈99,6% do número de polígonos da malha.

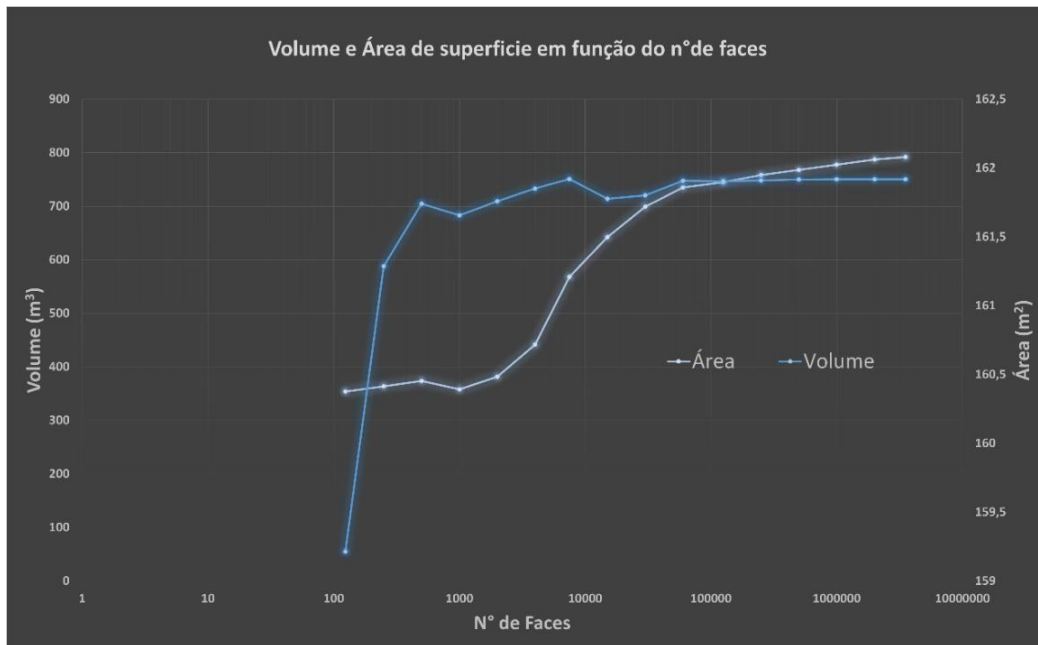


Gráfico 4.1: Influência da redução do número de faces no cálculo do volume e área

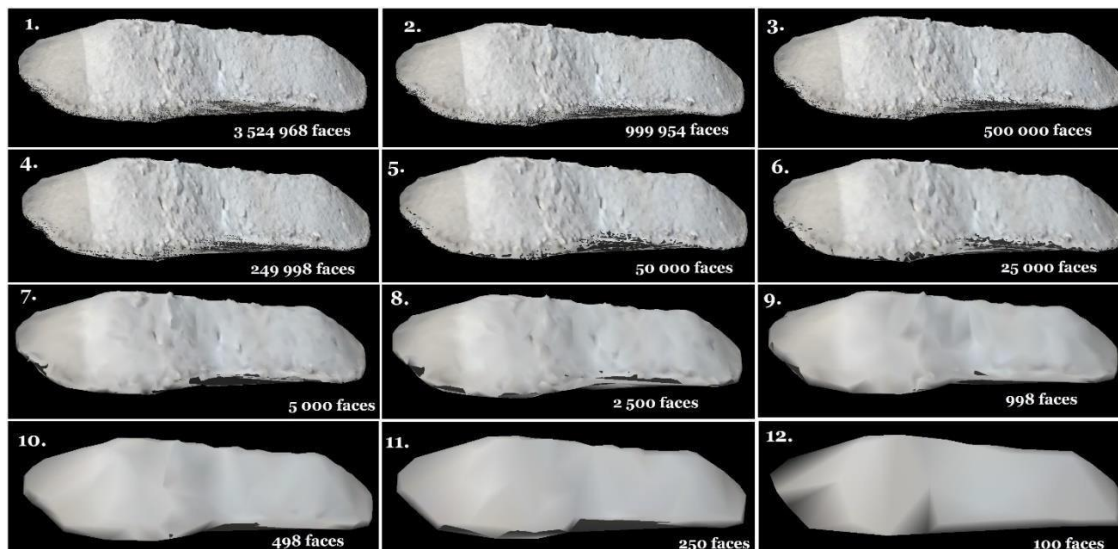


Figura 4.25: Evolução do aspeto do modelo 3D com redução do número de faces

Diretamente a partir da nuvem de pontos densa, é também possível realizar comparações, entre dois ou mais levantamentos em tempos distintos, de volumes e morfologias, o que permite uma análise muito rápida e fiável das mudanças que ocorreram

no terreno como, por exemplo, movimentação de materiais, com controlo de stocks, mudanças nas frentes de exploração da mina ou ainda monitorização da erosão dos taludes e deslizamentos de massas.

Neste trabalho, como só foi exequível a realização de um só levantamento, não foi possível fazer uma análise de comparação temporal.

4.3.3 Mapa de declives

Com base no MDT obtido anteriormente e, utilizando ferramentas de análise 3D do *software ArcMap*, foi construído um mapa de declives.

De notar que alguns dos ângulos de declive $>80^\circ$ estão incorretos, pois são locais que correspondem principalmente a zonas de vegetação intensa. Tal pode acontecer porque a classificação e remoção da vegetação no modelo pode não ter sido completa ou, por outro lado, a interpolação que o programa fez automaticamente nas zonas onde a vegetação foi removida não foi a mais adaptada, essencialmente devido à falta de pontos suficientes. Uma das soluções, por exemplo, seria utilizar um sensor LIDAR pois permite filtrar a vegetação e obter dados da superfície sob esta.

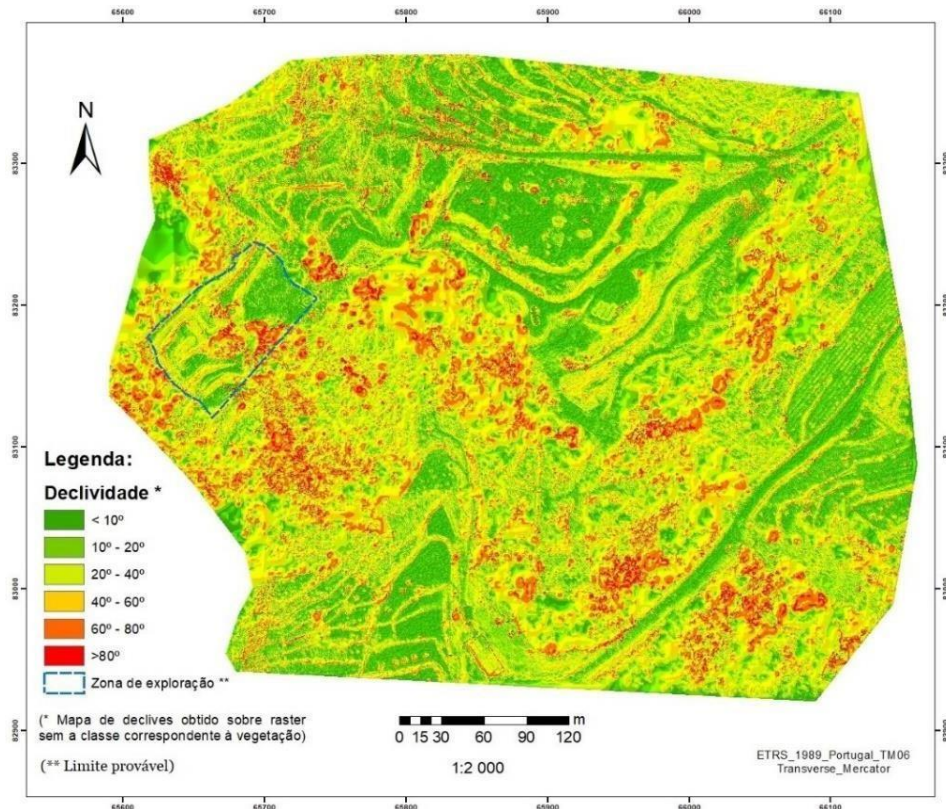


Figura 4.26: Mapa de declives

A obtenção do mapa de declives permite identificar e monitorizar zonas de maior suscetibilidade à erosão ou derrocadas e, por exemplo, conjuntamente com mapa de ocupação de solos, pode ainda ser utilizado para gerar outros mapas como mapas de suscetibilidade ou mapas de perigosidade.

4.3.4 Mapas de visibilidade

Foi ainda realizada uma análise sobre o impacto visual de uma zona ativa da mina (definindo um limite provável de zona de exploração) a partir das casas em redor e das estradas.

Recorrendo à ferramenta “*Viewshed*” do *ArcGIS*, foi utilizado como mapa base o MDS e definido como observadores, primeiro as casas e segundo as estradas, tendo sido gerado um mapa de visibilidade mostrando as áreas que são visíveis a partir das casas (Figura 4.27) e outro mapa de visibilidade que exhibe as áreas visíveis a partir das estradas (Figura 4.28).

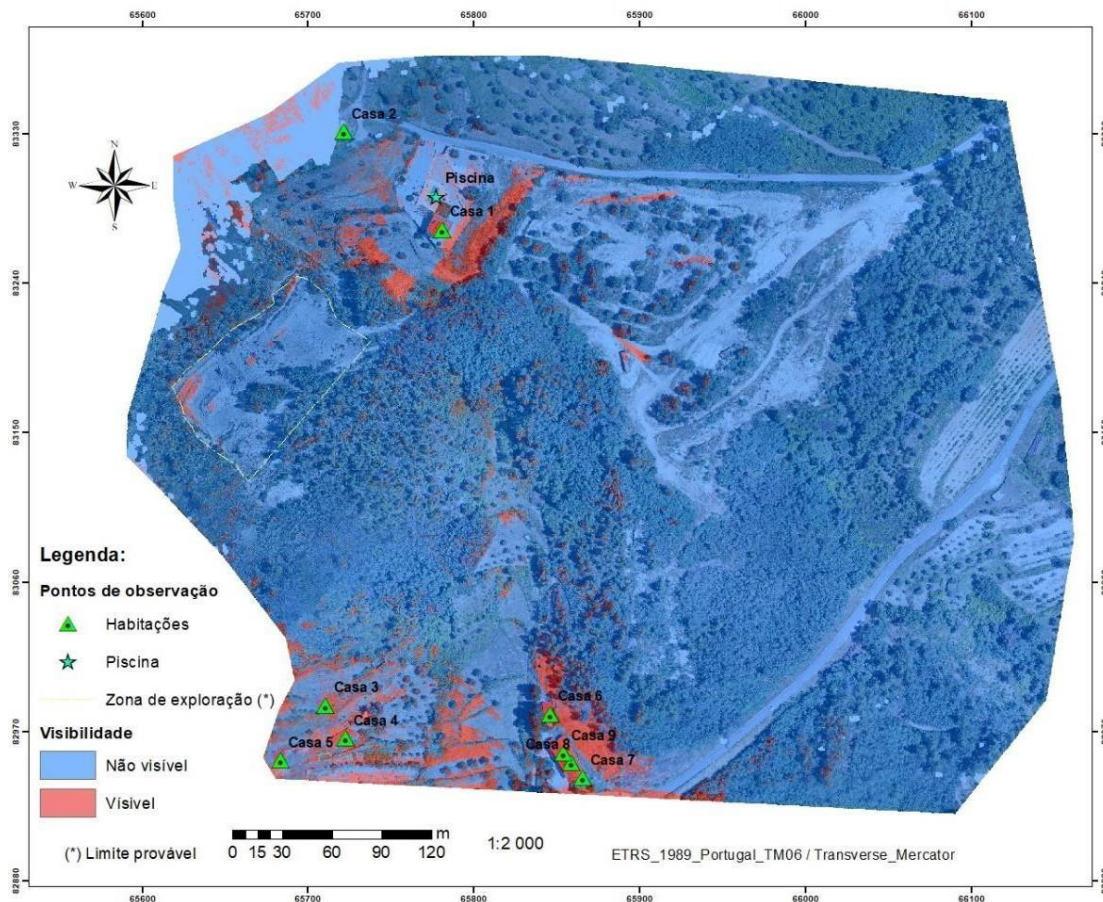


Figura 4.27: Mapa de visibilidade a partir das habitações

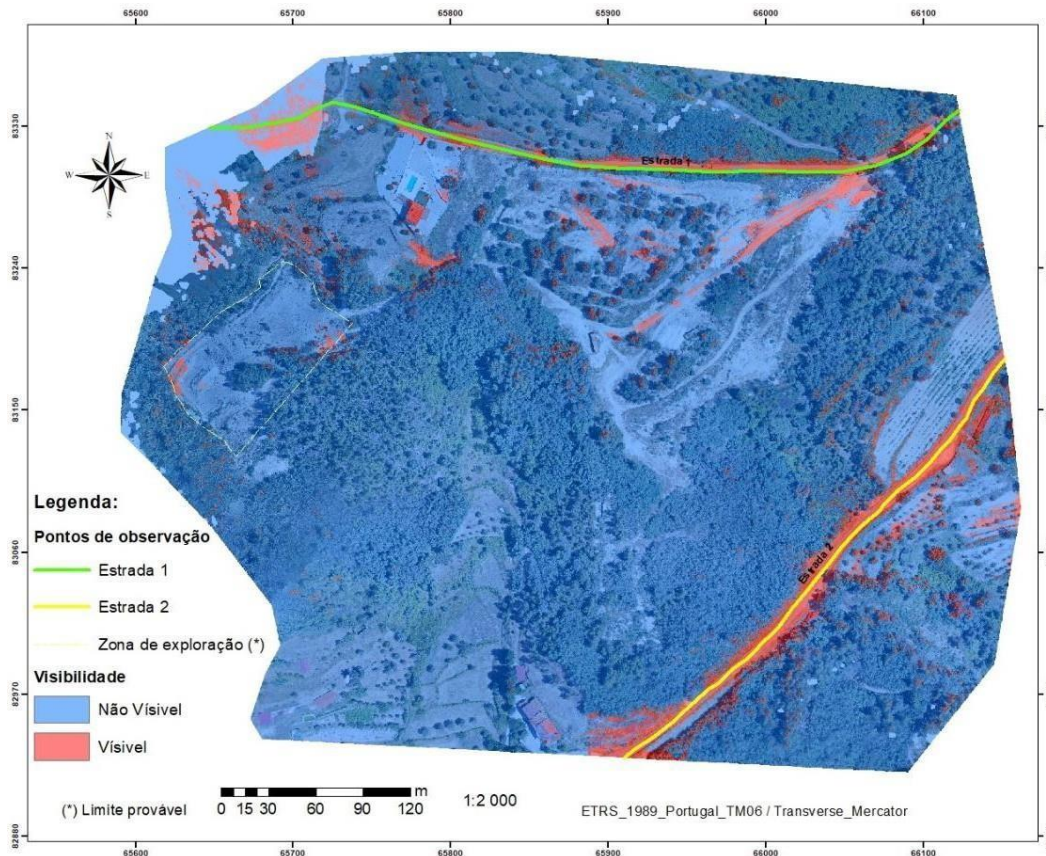


Figura 4.28: Mapa de visibilidade a partir das estradas

Ambos os mapas mostram que a percentagem da zona de exploração visível tanto no primeiro caso como no segundo é reduzida devido à morfologia do terreno e às barreiras formadas pela vegetação arbórea. A mina, a nível visual, apresenta assim, um baixo impacto ambiental.

4.3.5 Outros produtos cartográficos

Devido à confidencialidade de alguns dados, como anteriormente enunciado, apenas alguns levantamentos topográficos, previamente fornecidos em formato pdf, foram importados para a plataforma de SIG, o *software ArcMap*, e georreferenciados.

Foram também importados, para a mesma plataforma, alguns resultados obtidos no *Agisoft Metashape*, nomeadamente os ortomosaicos e as curvas de nível geradas a partir do modelo digital de terreno e com uma equidistância de 1 m.

A sobreposição das curvas de nível ao ortomosaico (Figura 4.29) permitiu obter, de forma muito expedita, um maior detalhe da morfologia.

Para além da rápida atualização da informação que pode ser realizada de forma muito regular no tempo, a obtenção das curvas de nível por este método permite uma maior

fiabilidade e rigor quando comparada às curvas de nível obtida por métodos topográficos convencionais e ainda a geração de mapas topográficos que, para além de terem uma maior resolução espacial, podem ter uma elevada resolução temporal. Mas não obstante a todas as vantagens, é de referir que, tal como quando gerado o mapa de declives foi possível verificar a existência de zonas com declive incorreto devido à influência da vegetação e falta de pontos, o mesmo sucede com as curvas de nível, havendo locais onde as curvas se encontram influenciadas por cotas que não correspondem à realidade. Mais uma vez este problema pode ser atenuado e corrigido recorrendo à tecnologia LIDAR acoplada ao drone.

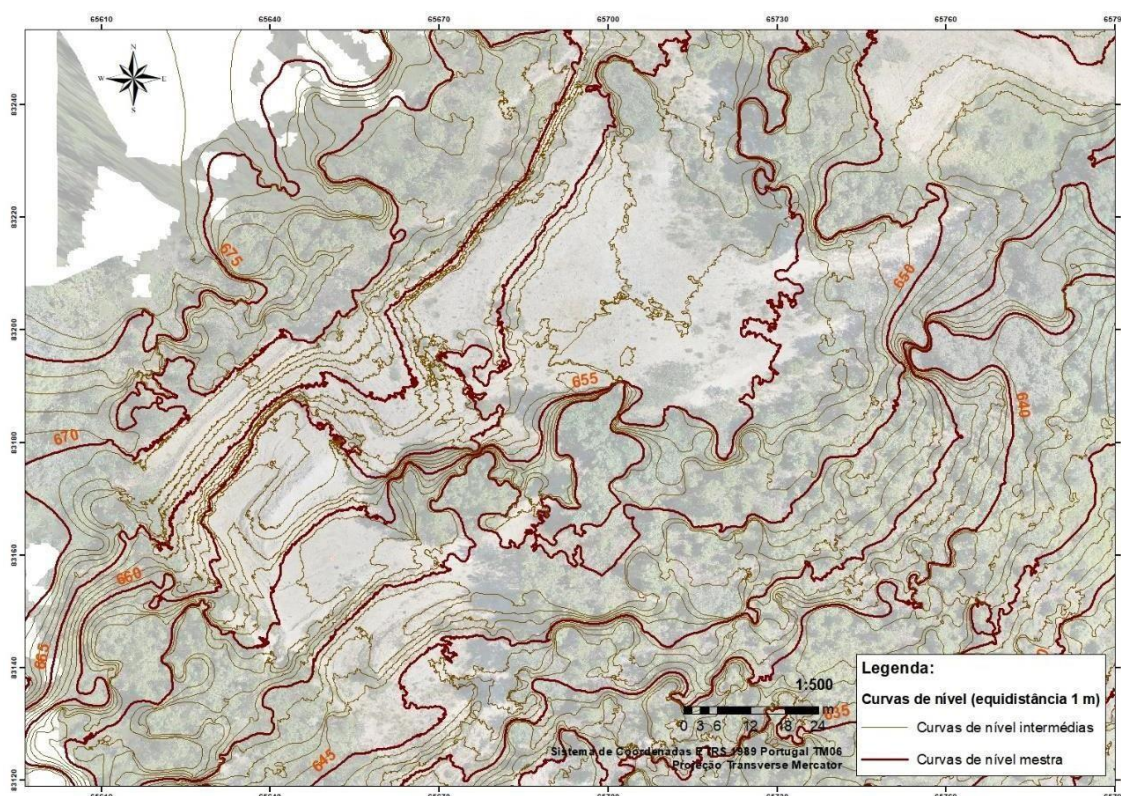


Figura 4.29: Mapa curvas de nível (equidistância 1 m) sobreposto ao ortomosaico

A sobreposição da planta obtida por métodos convencionais, ao ortomosaico (Figura 4.30), torna mais fácil, rápida e intuitiva a leitura da informação e permite, igualmente, reconstruir o mapa topográfico de uma forma mais detalhada, correta e eficiente.

Outra cartografia possível de construir utilizando a planta topográfica e o ortomosaico é a carta de ocupação do solo simplificada (Figura 4.31), permitindo identificar, mais uma vez de uma forma muito expedita, diferentes áreas como as áreas de vegetação, as zonas de frentes de exploração de mina, ativas e inativas, zonas de escombreiras, terrenos privados, entre outros.

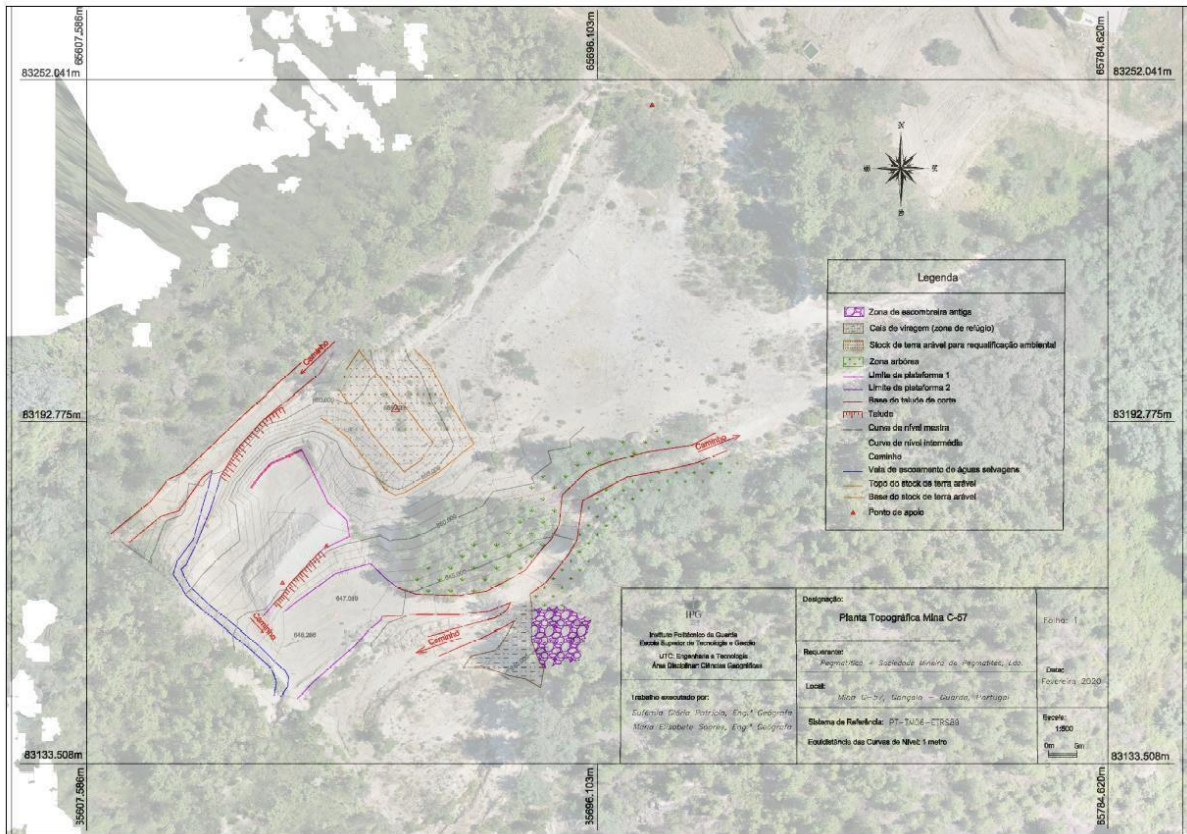


Figura 4.30: Planta topográfica com sobreposição de ortomosaico

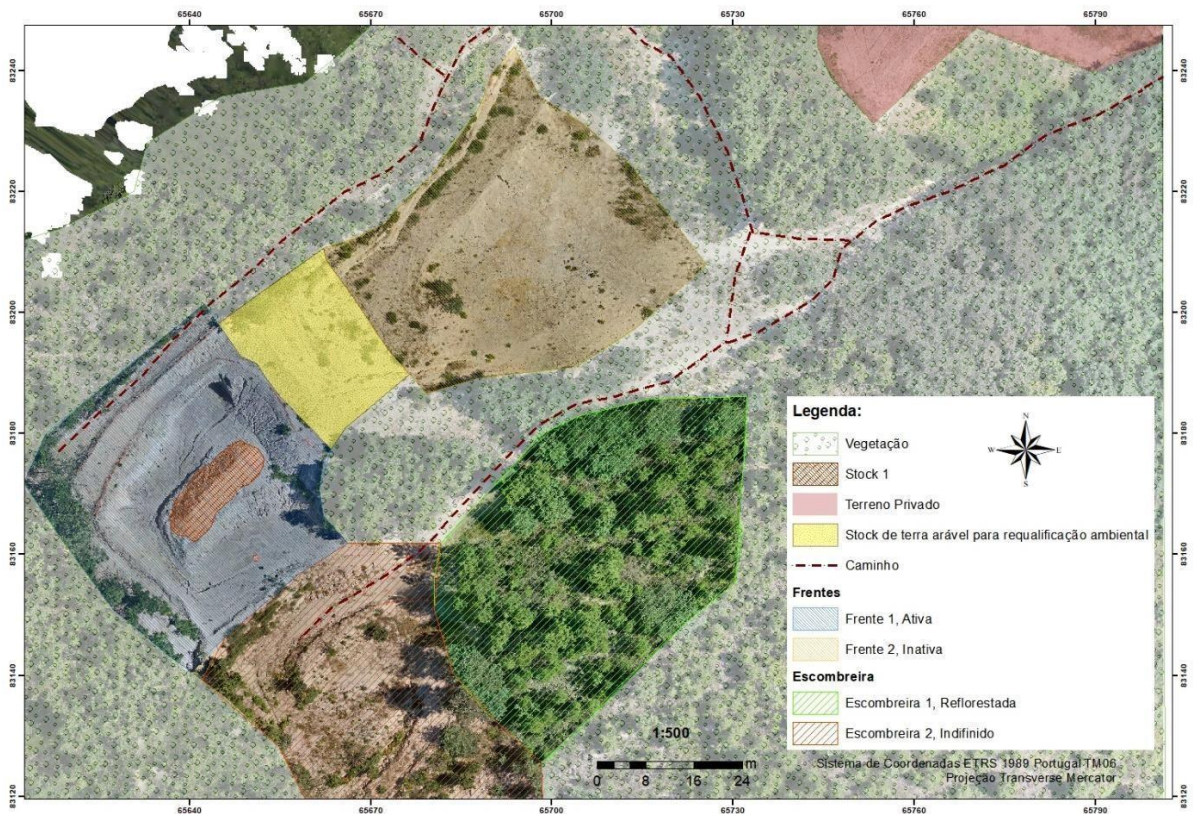


Figura 4.31: Carta de ocupação de solo simplificada

A mina é um local que não apresenta uma configuração igual ao longo do tempo, estando constantemente a ser alvo de alterações.

A obtenção de diversas cartas de ocupação do solo ao longo do tempo, pode ser vantajosa para obter diferentes registos temporais da configuração da mina e zona envolvente e ver a evolução, ao longo do tempo, do tipo de ocupação do solo.

As cartas de ocupação do solo permitem também fazer a gestão e monitorização, por exemplo, da requalificação ambiental, sinalizando qual a extensão das áreas a reabilitar, o tipo de vegetação a utilizar, as áreas já reabilitadas ou em fase de reabilitação. Estas cartas são ainda igualmente importantes, para conjuntamente com outro tipo de dados e mapas construir mapas de suscetibilidade e perigosidade.

5 Conclusões

Devido à limitação de recursos e tempo, apenas uma pequena parte da metodologia proposta no capítulo 3 foi realizada. Mesmo assim, foi possível demonstrar a enorme vantagem que a mesma pode fornecer quando aplicada a uma pequena média empresa mineira a céu aberto como é o caso da Mina C-57 “Castanho”.

Uma das principais vantagens é que basta um só operacional, um investimento inicial na compra de um drone relativamente acessível e um *hardware* e *software* adequado, para efetuar todo o fluxo da metodologia apresentada, não sendo necessária a contratação de mão de obra exterior sempre que é preciso realizar levantamentos que são demorosos e dispendiosos. Como consequência deste investimento, é possível aumentar o volume de dados e informações úteis a toda a gestão da mina, aumentar a eficiência de todas as operações e diminuir os gastos a longo prazo e os impactos negativos inerentes à exploração mineira. Para além disso, todo o processo desde a componente de campo, envolvendo o levantamento dos dados com recurso ao drone até à componente de gabinete, que envolve o processamento dos dados e a integração dos mesmos em plataforma SIG a fim de realizar diversas análises SIG (ex. análise de impacto visual da mina) e gerar diversos tipos de produtos (ex. mapas de declives, cálculos de volumes e áreas, curvas de nível), é um processo que demora relativamente pouco tempo, aproximadamente um dia e meio, quando utilizado um básico computador pessoal, podendo ser este tempo ainda mais reduzido utilizando um *hardware* mais competente.

Pode-se considerar que um dos primeiros produtos importantes obtidos são as nuvens de pontos densa, que são geradas automaticamente quando utilizada a tecnologia LIDAR ou obtidas a partir do processamento das imagens aéreas. E, diferentes nuvens de pontos densas registadas em espaços temporais diferentes, podem ser o ponto de partida para uma primeira análise expedita comparativa como, por exemplo, de mudanças na morfologia do terreno e frentes de exploração de mina ou ainda no volume de stock.

A utilização do drone multi-rotor mostrou-se ser o ideal pois, para além de ser de relativo fácil maneo e apresentar um voo consideravelmente estável, é o adequado para zonas de montanha e com espaços de manobra reduzidos, como o caso em estudo, que é caracterizado por intensa vegetação arbórea.

Devido às paredes dos taludes das frentes de exploração da mina serem muito íngremes (próximos da vertical) existe pouca informação e pormenor das mesmas, não tendo sido possível, por exemplo, fazer identificação da geologia e estruturas geológicas. Neste caso seria interessante e benéfico efetuar levantamentos locais verticais, fazendo

variando o eixo z (altura) e com a câmara numa posição aproximadamente horizontal, de modo a obter pormenores suficientes para visualizar e identificar características da geologia.

Apesar de ser necessário um maior investimento monetário quando comparado com a aquisição de um drone apenas com sensor RGB, talvez seja vantajoso, a compra de drone com sensor LIDAR, principalmente para um caso, como o em estudo, em que exista muita vegetação e o foco seja a superfície abaixo desta. Alguns produtos finais obtidos neste trabalho, como o modelo digital de terreno (Figura 4.20), o mapa de declives (Figura 4.26) e as curvas de nível (Figura 4.29) apresentam anomalias essencialmente devido à grande massa de vegetação que quando foi retirada, por método da classificação da nuvem de pontos densa, gerou um enorme défice de pontos, dificultando o processo de interpolação aquando da construção do MDT, gerando cotas incorretas. Tal pode ser evitado se usado um sensor LIDAR que vai permitir obter pontos reais da superfície terrestre, ou seja, é possível de forma quase direta obter o MDT.

A quantidade de “*deliverables*” passíveis de obter quando integrado e sobreposto diversos dados e informações em plataformas SIG, como dados geofísicos, geológicos, geoquímicos, modelos 3D DEM's, etc., são vastíssimos e podem ser aplicados não só na fase de exploração mineira, mas também na fase correspondente à fase de pesquisa e prospeção, e na fase final correspondente à fase de encerramento e requalificação ambiental.

Como muitas informações e mapas previamente fornecidos eram de carácter confidencial, o número de “*deliverables*” possíveis de obter foi mais reduzido, no entanto, ainda foi possível mostrar que a sobreposição de informação gerada com métodos convencionais, como os mapas topográficos, à informação gerada continuamente pelos métodos de deteção remota, como os ortomosaicos e curvas de nível, permite a construção expedita e aprimorada de novos mapas topográficos com melhor resolução espacial e temporal, permitindo ter um registo mais completo ao longo do tempo das mudanças da morfologia da mina que não é estática. É possível ainda a construção também de diversas cartas de ocupação do solo ao fim de cada levantamento por deteção remota sendo útil, por exemplo, para gerir e monitorizar, questões relacionadas com a requalificação ambiental ou ainda para conjuntamente com outro tipo de mapas, como os mapas de declive, construir mapas de suscetibilidade e perigosidade.

A mais importante conclusão é que uma pequena média empresa pode ter ao seu dispor de forma fácil e de relativo baixo custo, principalmente quando visto de uma perspectiva a longo prazo, ferramentas poderosas que permitem a obtenção de um largo conjunto de dados atualizados sempre que necessário, monitorizar e aumentar a eficácia de todas as etapas e operações inerentes à mina e, de uma forma muito importante, contribuir para uma exploração mineira mais segura e sustentável com a redução de riscos intrínsecos à própria atividade mineira.

6 Bibliografia

- Agisoft LLC. (2019). *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.5*.
- Alves, J. A. D., Cruz, J. J. S., & Norte, C. G. (1988). *Manual de Topografia* (Vol. I). Lisboa: PF.
- Aronoff, S. (2005). *Remote Sensing for GIS Managers* (1st ed.). ESRI Press.
- Azevedo, M., & Aguado, B. (2013). Origem e instalação dos Granitoides Variscos na Zona Centro-Ibérica. In R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha, & J. C. Kullberg (Eds.), *Geologia de Portugal. Volume 1 - Geologia Pré-mesozóica de Portugal* (pp. 377–401). Lisboa: Escolar Editora.
- Burns, E. (2021). machine learning. *TechTarget*. Retrieved September 6, 2021, from <https://searchenterpriseai.techtarget.com/definition/machine-learning-ML>
- Carolino, A. (2017). Pegmatítica- Sociedade Mineira de Pegmatitos, Lda. *Workshop meeting, Prague, Czech Republic*. Remix - Interreg Europe.
- Carrivick, J. L., Smith, M. W., & Quincey, D. J. (2016). *Structure from Motion in the Geosciences*. Wiley.
- Casaca, J., Matos, J., & Baio, M. (2005). *Topografia Geral* (7th ed.). Lisboa: Lidel.
- Chang, K. (2019). *Introduction to Geographic Information Systems* (9ªEd.). McGraw-Hill Education.
- Chapman, A. (2016). DRONE TYPES: MULTI-ROTOR VS FIXED-WING VS SINGLE ROTOR VS HYBRID VTOL. *auav*. Retrieved June 4, 2021, from <https://www.auav.com.au/articles/drone-types/>
- Choi, Y., Baek, J., & Park, S. (2020). Review of GIS-Based Applications for Mining: Planning, Operation, and Environmental Management. *Applied Sciences*, 10(7), 25. MDPI.
- Chrystianne, P. (2011). Evolução Humana. *A Revolução Tecnológica*. Retrieved from <http://arevolucaotecnologica.blogspot.com/2011/09/evolucao-humana.html>
- Cosme, A. (2012). *Projeto em Sistemas de Informação Geográfica*. Lisboa: Lidel.
- Davids, C., & Rouyet, L. (2018). *Remote sensing for the mining industry*. Norut.
- Dempsey, C. (2019). Who Coined the Term ‘Remote Sensing’? *Geographic Realm*. Retrieved January 27, 2021, from <https://www.geographyrealm.com/who-coined-the-term-remote-sensing/>
- DGEG. (2021). Concessões mineiras. *Direção Geral de Energia e Geologia*. Retrieved January 21, 2021, from <https://agserver.sg.min-economia.pt/arcgis/services/DGEG/CM/MapServer/WFSServer>
- Diário da República. (2012). Estratégia Nacional para os Recursos Geológicos - Recursos

- Minerais. *Diário da República, 1ª série*(nº176), 5188.
- DJI. (2021). Mavic 2 Pro & Mavic 2 Zoom. *MAVIC 2Specs*. Retrieved October 1, 2021, from <https://www.dji.com/pt/mavic-2/info>
- Dukowitz, Z. (2020). Drones in Mining: How Drones Are Helping Visualize Underground Spaces too Dangerous to Enter. *UAV Coach*. Retrieved August 29, 2021, from <https://uavcoach.com/drones-mining/>
- EIT RawMaterials. (2020). Game of drones – unmanned aerial vehicles in mineral exploration and geological mapping. Retrieved August 28, 2021, from <https://eitrawmaterials.eu/game-of-drones-unmanned-aerial-vehicles-in-mineral-exploration-and-geological-mapping/>
- Farinha Ramos, J. M. (2010). Aplitopegmatitos com mineralizações de metais raros de Seixo Amarelo-Gonçalo. O Recurso Geológico. In J. M. Coteló Neiva, A. Ribeiro, V. Mendes, F. Noronha, & M. Ramalho (Eds.), *Ciências Geológicas-Ensino, Investigação e sua História. Volume II, Geologia Aplicada* (pp. 121–130). Lisboa: Associação Portuguesa de Geólogos. Sociedade Geológica de Portugal.
- Ferrovial. (2021). Drones. *ferrovial*. Retrieved June 4, 2021, from <https://www.ferrovial.com/en-ca/innovation/technologies/drones/>
- Flyability. (2021). COMMERCIAL DRONES: INDUSTRIES THAT USE DRONES, DELIVERABLES, AND OUR LIST OF THE TOP MODELS ON THE MARKET. Retrieved September 21, 2021, from <https://www.flyability.com/commercial-drones>
- Freguesia de Gonçalo. (2020). História. Retrieved November 6, 2020, from <https://www.freguesiadegoncalo.pt/resenha-historica>
- G.C. (2020). Geomatics. *Government of Canada*. Retrieved May 10, 2021, from <https://www.nrcan.gc.ca/science-data/science-research/earth-sciences/geomatics/10776>
- García, M. L., Brondo, J. A. E., & Pérez, M. A. (2012). *Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio*. (P. y A. del G. de C. Consejería de Agricultura, Ganadería, Ed.). SATELMAC.
- Ghilani, C. D., & Wolf, P. R. (2015). *Elementary Surveying. An Introduction to Geomatics* (14 th.). Pearson Education.
- GlobalData Thematic Research. (2021). Drones in Mining: Drone Applications in Mining. *Mining Technology*. Retrieved August 26, 2021, from <https://www.mining-technology.com/comment/drone-applications-mining/>
- Gomasasca, M. A. (2009). *Basics of Geomatics*. Springer.
- Grind Drone. (2021). Drone Components And What They Do. Retrieved from <https://grinddrone.com/drone-features/drone-components>
- Gupta, R. P. (2018). *Remote Sensing Geology* (3rd ed.). Springer.

- Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 91, 32.
- Heywood, I., Cornelius, S., & Carver, S. (2011). *An introduction to Geographical Information Systems* (4th ed.). Pearson.
- Inglesias, J. M. (2015). ¿Qué es una cámara digital? *SlidePlayer*. Retrieved September 24, 2021, from <https://slideplayer.es/slide/5886656/>
- iTarg3T. (2021). Pegmatítica - Sociedade Mineira de Pegmatites Ltda. Retrieved September 28, 2021, from <https://www.itarg3t.eu/Members/Pegmatitica.html>
- Jensen, J. R., & Jensen, R. R. (2013). *Introductory Geographic Information Systems*. Pearson.
- Kardasz, P., Doskocz, J., Hejduk, M., Wiejkut, P., & Zarzyck, H. (2016). Drones and Possibilities of Their Using. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 6(3), 7.
- Kirsch, M., Lorenz, S., Zimmermann, R., Tusa, L., Möckel, R., Hödl, P., Booyesen, R., et al. (2018). Integration of Terrestrial and Drone-Borne Hyperspectral and Photogrammetric Sensing Methods for Exploration Mapping and Mining Monitoring. *Remote Sensing*, 10(1366), 31. MDPI.
- Konecny, G. (2014). *Geoinformation: Remote Sensing, Photogrammetry, and Geographic Information Systems* (2nd ed.). CRC Press Taylor & Francis Group.
- Krishnaraj, S., Kumar, R. S., Krishnan, A. G., Ganeshkumar, G., Mohan, M., & Nirmal, M. (2021). Aerodynamic Analysis of Hybrid Drone. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* (p. 15). IOP Publishing.
- Lee, G. (2021). Drones: From Europe to Asia, mining drones are taking over more than just mapping. *Verdict*. Retrieved August 28, 2021, from <https://www.verdict.co.uk/from-europe-to-asia-mining-drones-are-taking-over-more-than-just-mapping/>
- Liang, S., Li, X., & Wang, J. (Eds.). (2012). *Advanced Remote Sensing. Terrestrial Information Extraction and Applications*. Elsevier, Academic Press.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th ed.). Wiley.
- Linder, W. (2016). *Digital Photogrammetry - A Practical Course* (4th ed.). Springer.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2005). *Geographical Information Systems and Science* (2nd ed.). Wiley.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic Information Science & Systems* (4th ed.). Wiley.
- Mateus, A., & Noronha, F. (2010). Sistemas mineralizantes epigenéticos na Zona Centro-Ibérica; Expressão da estruturação orogénica Meso- a tardi- Varisca. In J. M. Coteló Neiva, A. Ribeiro, V. Mendes, F. Noronha, & M. Ramalho (Eds.), *Ciências Geológicas-Ensino, Investigação e sua História. Volume II, Geologia Aplicada* (pp. 47–61).

- Lisboa: Associação Portuguesa de Geólogos. Sociedade Geológica de Portugal.
- Matos, J. (2008). *Fundamentos de Informação Geográfica* (6th ed.). Lisboa: Lidel.
- McCormac, J. (2007). *Topografia* (5th ed.). LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- Merkert, R., & Bushell, J. (2020). Managing the drone revolution: A systematic literature review into the current use of airborne drones and future strategic directions for their effective control. *Journal of Air Transport Management*, 89, 10.
- Mining. (2020). The Mining Sector Puts Drones to Work. *Mining Global*. Retrieved August 26, 2021, from <https://miningglobal.com/technology/mining-sector-puts-drones-work>
- NASA's Imagine the Universe. (2013). The Electromagnetic Spectrum. *National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center*. Retrieved May 10, 2021, from <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>
- Navarro, R. F. (2006). A Evolução dos Materiais. Parte1: da Pré-história ao Início da Era Moderna. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 11.
- NRC. (2019). Fundamentals of Remote Sensing. *Natural Resources Canada (NRC)*. Retrieved April 28, 2021, from <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>
- Park, S., & Choi, Y. (2020). Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Mining from Exploration to Reclamation: A Review. *Minerals*, 10(8), 31.
- PTRobotics. (2021). IMU. *PTRobotics-Especialistas em componentes electrónicos*. Retrieved September 9, 2021, from <https://www.ptrobotics.com/317-imu>
- Quinta Ferreira, M., & Antão, A. M. (2003). Alteração do granito da Guarda (Portugal) - Algumas correlações entre índices geoquímicos. *IV Congresso Ibérico de Geoquímica e XIII Semana de Geoquímica* (pp. 165–167). Coimbra.
- Ramos, J. F. (2007). Locality No.5: Seixo Amarelo-Gonçalo Rare Element Aplite-Pegmatite Field. In A. Lima & E. R. Robles (Eds.), *Granitic Pegmatites: the state of the art – International Symposium. Field Trip Guidebook* (Vol. N.º9, pp. 72–86). Porto: Universidade do Porto- Faculdade de Ciências. Departamento de Geologia.
- Ramos, J. F., Ribeiro, A., & Barriga, F. J. A. S. (1994). Mineralizações de metais raros de Seixo Amarelo-Gonçalo (Guarda). Breve Nota Introdutória. *Boletim de Minas. Volume 31 N.º2* (pp. 101–115). Lisboa: Instituto Geológico e Mineiro.
- Ramos, J. M. F., Bravo Silva, P., Neiva, A. M. R., & Gomes, E. P. (2006). Evolução geoquímica de pegmatitos LCT da região Centro de Portugal no sentido do enriquecimento em lepidolite. *VII Congresso Nacional de Geologia* (pp. 1193–1198). Estremoz.
- Ramos, J. M. F., & Noronha, F. (1995). Condições de deposição da fase litinífera principal

- no campo filoniano aplitopegmatítico de Seixo Amarelo-Gonçalo. *IV Congresso Nacional de Geologia. Resumos alargados* (pp. 599–604). Porto.
- Reddy, M. A. (2008). *Textbook of Remote Sensing and Geographical Information Systems* (3rd ed.). BS Publications.
- Ribeiro, A. (2013). Evolução geodinâmica de Portugal; os ciclos ante-mesozóicos. In R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha, & J. C. Kullberg (Eds.), *Geologia de Portugal. Volume 1 - Geologia Pré-mesozóica de Portugal* (pp. 15–57). Lisboa: Escolar Editora.
- Ribeiro, A., Antunes, M. T., Ferreira, M. P., Rocha, R. B., Soares, A. . F., Sbyszewski, G., Moitinho de Almeida, F., et al. (1979). *Introduction à la Géologie Générale du Portugal*. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.
- Rodrigues, P. M. S. M., Antão, A. M. M. C., & Rodrigues, R. (2019). Evaluation of the impact of lithium exploitation at the C57 mine (Gonçalo, Portugal) on water, soil and air quality. *Environmental Earth Sciences*, 78(533), 14. Springer.
- S.T.A. (2021). Drones - Educational Material. *Swedish Transport Agency*, 93.
- Salmirinne, H., Heincke, B., Jackisch, R., & Saartenoja, A. (2020). Science Blog: Game of drones – unmanned aerial vehicles in mineral exploration and geological mapping. *GTK, Geological Survey of Finland*. Retrieved August 28, 2021, from <https://www.gtk.fi/en/science-blog-game-of-drones-unmanned-aerial-vehicles-in-mineral-exploration-and-geological-mapping/>
- SEOS. (2021). Introduction to Remote Sensing. *Science Education through Earth Observation for High Schools (SEOS)*. Retrieved February 25, 2021, from <https://seos-project.eu/remotesensing/remotesensing-c01-p05.html>
- Shahmoradi, J., Talebi, E., Roghanchi, P., & Hassanalian, M. (2020). A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry. *Drones*, 4(34), 25.
- Silva, A. N., Lira, C., Taborda, R., Dias, E., Catalão, J., & Amorim, A. (2016). *Sistemas de Informação Geográfica: Análise Espacial* (DGRM-Dir.).
- Silva, P. G. (2010). Exploração mineira, memória e resistência: as retóricas ecológicas populares no conflito entre pequenos proprietários rurais e a indústria mineira no centro de Portugal. *Ambiente & Sociedade*, XIII(1), 65–81.
- Silva, P. G. (2016). Mobilização e narrativas populares contra a exploração mineira em Portugal: o caso da dragagem de estanho (1914-1974). In P. E. Guimarães & J. D. P. Cebada (Eds.), *Conflitos Ambientais na Indústria Mineira e Metalúrgica: o passado e o presente* (Centro de., pp. 291–312).
- Smith, L. (2000). Remote-Sensing Technologies. *GIS Lounge*. Retrieved January 29, 2021, from <https://www.gislounge.com/remote-sensing-technologies/>
- SSIUSC. (2020). 3 GIS Technology Advancements in the Last 5 Years. *Spatial Sciences*

- Institute, University of Southern California*. Retrieved May 4, 2021, from <https://gis.usc.edu/blog/3-gis-technology-advancements-in-the-last-5-years/>
- SSIUSC. (2021). The Future of GIS. *Spatial Sciences Institute, University of Southern California*. Retrieved May 4, 2021, from <https://gis.usc.edu/blog/the-future-of-gis/>
- Teixeira, C., Ávila Martins, J., Medeiros, A. C., Pilar, L., Pinto de Mesquita, L., & Neves Ferro, M. (1963). *Carta geológica de Portugal na escala 1/50 000. Notícia Explicativa da Folha 18-C Guarda*. Lisboa.
- Tkáč, M., & Mésároš, P. (2019). Utilizing drone technology in the civil engineering. *SSP - JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING*, 14(1).
- Watts, A. C., Ambrosia, V. G., & Hinkley, E. A. (2012). Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Remote Sensing*, 4(6), 21.
- Werner, T. T., Bebbington, A., & Gregory, G. (2019). Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing. *The Extractive Industries and Society*, (6), 993–1012. Elsevier.
- Wing, M. G., & Bettinger, P. (2008). *Geographic Information Systems: Applications in Natural Resource Management* (2nd ed.). Oxford.
- Wingtra. (2021). *EBook: Why use drones in mining and aggregates*. Retrieved from https://wingtra.com/wp-content/uploads/downloads/e-book-drones-in-mining-and-aggregates.pdf?utm_campaign=Marketing_funnel_%2F%2FAccuracy&utm_medium=email&_hsmi=94978228&_hsenc=p2ANqtz-_ky-uCP8l4VRRZNua2lv6Yt_IKikyMJGtKJHnWIWPez3yLA_Q8lps5aNW5pbn1QIvd2kJM
- Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS* (4th ed.). McGraw-Hill Education. Retrieved from 978-0-07-176111-6
- Xerez, A. C. (1966). *Topografia Geral - Topografia, Fotogrametria, Elementos de Geodesia e de Astronomia Geodésica* (2nd ed., Vol. II). Técnica - Revista da Associação de Estudantes do I.S.T.