U.PORTO

FLUP FACULDADE DE LETRAS
UNIVERSIDADE DO PORTO

MESTRADO EM RISCOS, CIDADES E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO
PREVENÇÃO DE RISCOS E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

# Proposta metodológica de baixo custo para monitorização de arribas potencialmente instáveis

## Aplicação no estudo do litoral de Torres Vedras

Nuno André da Cruz Aniceto Ramos

**Julho**

**2021**



Nuno André da Cruz Aniceto Ramos

# Proposta metodológica de baixo custo para monitorização de arribas potencialmente instáveis

## Aplicação no estudo do litoral de Torres Vedras

Relatório de estágio realizado no âmbito do Mestrado em Riscos, Cidades e Ordenamento do Território

Orientação do Professor Doutor António Alberto Teixeira Gomes

Coorientação do Professor Doutor Jesús Horacio García

Faculdade de Letras da Universidade do Porto

2021

Nuno André da Cruz Aniceto Ramos

# Proposta metodológica de baixo custo para monitorização de arribas potencialmente instáveis

## Aplicação no estudo do litoral de Torres Vedras

Relatório de estágio realizado no âmbito do Mestrado em Riscos, Cidades e Ordenamento do Território

Orientação do Professor Doutor António Alberto Teixeira Gomes

Coorientação do Professor Doutor Jesús Horacio García

# Membros do Júri

Professor Doutor (escreva o nome do/a Professor/a)

Faculdade (nome da faculdade) - Universidade (nome da universidade)

Professor Doutor (escreva o nome do/a Professor/a)

Faculdade (nome da faculdade) - Universidade (nome da faculdade)

Professor Doutor (escreva o nome do/a Professor/a)

Faculdade (nome da faculdade) - Universidade (nome da faculdade)

Classificação obtida: (escreva o valor) Valores

# Sumário

Declaração de honra ..... 4
Agradecimentos ..... 5
Resumo ..... 6
Abstract ..... 7
Índice de Figuras ..... 8
Índice de Tabelas ..... 11
Índice de Gráficos ..... 12
Lista de abreviaturas e siglas ..... 13
Introdução ..... 14
**Capítulo I – Enquadramento ..... 18**
1.1. Monitorização do litoral ..... 19
1.1.1. *Structure-from-Motion* (SfM) *with Multi-View Stereo* (MVS) ..... 21
1.1.1.1. *Groud Control Points* (GCPs) – Pontos de controlo ..... 24
1.1.1.2. Aeronaves Não Tripuladas (UAS) ..... 25
1.1.2. Change Detection ..... 28
1.2. Arribas, Processos e Movimentos de Vertente ..... 31
**Capítulo II – Materiais e metodologia ..... 39**
2.1. Materiais ..... 39
2.1.1. Aeronave não tripulada – *DJI Mavic Mini* ..... 41
2.1.2. DGPS Emlid Reach RS2 ..... 42
2.1.3. Agisoft Metashape Professional 1.6.4 ..... 43
2.1.4. CloudCompare v2.12 alpha ..... 44
2.1.5. Geomorphic Change Detection 7. ..... 44
2.2. Procedimento metodológico ..... 45
2.2.1. Aquisição de dados ..... 48
2.2.1.1. Fotografia aérea ..... 48
2.2.1.2. *Groud Control Points* (GCP) aplicados nas áreas de estudo ..... 49
2.2.2. Processamento de dados ..... 51
2.2.2.1. *Structure-from-Motion with Multi-View Stereo* ..... 51
2.2.2.2. *Change Detection* ..... 54

**Capítulo III – Resultados ..... 57**
3.1. Litoral do Concelho de Torres Vedras ..... 57
3.1.1. Condições fisiográficas do litoral de Torres Vedras ..... 58
3.1.2. Tipos de movimentos de vertente nas arribas de Torres Vedras ..... 63
3.2. Condições meteorológicas e oceanográficas ..... 65
3.2.1. Temperatura ..... 65
3.2.2. Precipitação ..... 66
3.2.3. Vento ..... 67
3.2.4. Ondulação ..... 67
3.3. Identificação e interpretação de processos erosivos nas arribas ..... 69
a) Praia da Mexilhoeira ..... 69
b) Praia da Vigia ..... 76
c) Porto de Pesca da Assenta ..... 79
d) Praia das Conchas ..... 82
e) Miradouro da Formosa ..... 83
f) Acesso a Porto Barril ..... 85
3.4. 2.5D *Change Detection* (*DoD*) ..... 87
a) Praia da Mexilhoeira ..... 87
b) Praia da Vigia ..... 90
c) Porto de Pesca da Assenta ..... 92
*3.5.* 3D *Change Detection* ..... 94
a) Praia da Mexilhoeira ..... 94
b) Praia da Vigia ..... 95
c) Porto de Pesca da Assenta ..... 96
**Capítulo IV – Proposta metodológica de baixo custo ..... 97**
**Capítulo V – Considerações finais ..... 102**
Referências Bibliográficas ..... 105

## Declaração de honra

Declaro que o presente relatório de estágio é de minha autoria e não foi utilizado previamente noutro curso ou unidade curricular, desta ou de outra instituição. As referências a outros autores (afirmações, ideias, pensamentos) respeitam escrupulosamente as regras da atribuição, e encontram-se devidamente indicadas no texto e nas referências bibliográficas, de acordo com as normas de referenciação. Tenho consciência de que a prática de plágio e auto-plágio constitui um ilícito académico.

Faculdade de Letras da Universidade do Porto, julho de 2021

Nuno André Ramos

# Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor António Alberto Teixeira Gomes, pelo acompanhamento determinante e colaborativo, pela disponibilidade para as reuniões e trabalho de campo onde muito se aprende, e pelo contributo para o meu desenvolvimento académico e profissional.

Ao Professor Doutor Jesús Horacio García (Universidade de Santiago de Compostela), pela sua coorientação, pela disponibilidade e interesse demonstrado em colaborar e acompanhar este trabalho.

À Área de Planeamento Estratégico e Territorial da Câmara Municipal de Torres Vedras, designadamente ao meu orientador de estágio, Arquiteto Carlos Figueiredo – Chefe da Divisão de Planeamento Estratégico e Territorial –, e ao Urbanista Nuno Patrício – Responsável da Área de Planeamento –, pela disponibilidade em me receber para a realização do estágio, pela integração, cedência de materiais e ensinamentos transmitidos face às limitações que o momento implicou.

À Professora Doutora Maria Assunção Araújo, pela cedência do DGPS utilizado, que permitiu a recolha das coordenadas necessárias.

Ao Tiago e ao Orlando pela amizade e companheirismo ao longo da vida e do meu percurso académico.

À minha família e, em especial à minha irmã, Catarina, por terem possibilitado todo o meu percurso até chegar à conclusão deste ciclo de estudos, assim como por terem contribuído de diversas formas para a realização deste trabalho e para o meu desenvolvimento pessoal.

## Resumo

A zona costeira é extremamente ativa, onde convergem diversos agentes geodinâmicos que contribuem para a sua constante evolução morfológica. Uma das formas litorais mais comuns são as arribas e nelas ocorrem movimentos de massa que contribuem para a alteração do seu perfil, representando um risco elevado para pessoas e bens, tanto no seu topo como na sua base. A evolução das arribas é espacialmente diferente e resulta da conjugação de diversos fatores – como a morfologia, a resistência das rochas, a exposição das vertentes e a ação dos agentes erosivos – que condicionam a sua estabilidade.

No contexto da prevenção de riscos no litoral e do ordenamento do território, a monitorização das zonas costeiras é fundamental no acompanhamento das suas dinâmicas, tendências e alterações geomorfológicas. Este trabalho apresenta uma proposta metodológica experimental de baixo custo, aplicada a nível municipal, que, combinando a utilização de uma aeronave não tripulada (UAS) com a aplicação da técnica de fotogrametria *Structure-from-Motion with Multi-View Stereo* (SfM-MVS), permite: verificar, em segurança, a presença de sinais de instabilidade e antecipar eventos perigosos; obter informação cartográfica regular e de alta resolução e precisão; apurar e quantificar as alterações ocorridas entre um intervalo temporal; e, a médio/longo prazo, determinar a taxa de recuo das arribas, assim como contribuir para a identificação de padrões que promovem a erosão costeira.

Os resultados alcançados demonstram as potencialidades desta metodologia, que contribui para a gestão do litoral e para o suporte de tomadas de decisão. Comprovam a sua eficácia e precisão decimétrica através dos produtos gerados, evidenciando a dinâmica do litoral do concelho de Torres Vedras. Foram registadas diversas ocorrências significativas num curto período de tempo revelando, ainda, sinais de instabilidade que durante a época balnear podem ser um risco preocupante para os veraneantes, demonstrando a importância da implementação de um plano de monitorização regular.



**Palavras-chave:** monitorização, arribas, UAS, *Structure-from-Motion*, Torres Vedras.

## Abstract

The coastal zone is extremely active, where multiple geodynamic agents converge, contributing to its constant morphological evolution. One of the most common coastal forms are cliffs, where it occurs mass movements that contribute to the change of its profile, representing a high risk for people and goods, both at its top and base. The evolution of coastal cliffs is spatially different and it is the result of a combination of various factors – such as morphology, rock strength, exposure of slopes and the action of erosive agents – which determine their stability.

In the context of coastal risk prevention and spatial planning, the monitoring of cliffs plays a key role in monitoring their dynamics, trends, and geomorphological changes. This work aims to present a low-cost experimental methodological approach, applied at a municipal level which, combining the use of an unmanned aircraft (UAS) with the application of the Structure-from-Motion with Multi-View Stereo (SfM-MVS) photogrammetry technique, allows to safely check for signs of instability and anticipate dangerous events; obtain high resolution and accurate cartographic data often; determine and quantify the changes occurred in a certain period; and, in a medium/long term, assess the cliff retreat rate and contribute to the identification of patterns that promote coastal erosion.

The results accomplished demonstrate the potential of this methodology. It contributes to the management of the coast and support the decision making. Through the products generated, the results prove the effectiveness and decimetric precision obtained, highlighting the dynamics of the coastline of the municipality of Torres Vedras.

Several occurrences of mass movements were recorded in a short period time, revealing signs of instability that during the bathing season can result in a high risk for exposed vacationers, demonstrating the importance of implementing a regular coastal monitoring plan.



**Keywords:** monitoring, coastal cliffs, UAV, Structure-from-Motion, Torres Vedras.

# Índice de Figuras

Figura 1 – Sistemas litorais distintos. ..... 15
Figura 2 – Arriba da Praia da Mexilhoeira. ..... 16
Figura 3 – Arriba da Praia da Mexilhoeira após desabamento. ..... 16
Figura 4 – Aerofotogrametria *vs.* LiDAR. ..... 20
Figura 5 – Processamento SfM-MVS. ..... 22
Figura 6 – Fotografia aérea *nadir*. ..... 24
Figura 7 – Fotografia aérea *off-nadir*. ..... 24
Figura 8 – Plataformas contrastantes (GCP). ..... 24
Figura 9 – Vegetação e tampa de saneamento utilizadas como GCP. ..... 24
Figura 10 – *Drone* de asa fixa. ..... 26
Figura 11 – *Drone* quadricóptero. ..... 26
Figura 12 – Esquema do método de deteção de alterações *DoD.* ..... 29
Figura 13 – *Cloud to Cloud* (C2C). ..... 29
Figura 14 – *Cloud to Model* (C2M). ..... 29
Figura 15 – Ilustração simplificada do algoritmo M3C2. ..... 30
Figura 16 – Elementos geomorfológicos principais das arribas. ..... 31
Figura 17 – Distribuição espacial de processos erosivos nas arribas. ..... 32
Figura 18 – Desaparecimento de bloco por ação do mar. Praia da Ponta da Vela. ..... 38
Figura 19 – Erosão basal. Formação de sapa na Praia Azul. ..... 38
Figura 20 – *DJI Mavic Mini*. ..... 41
Figura 21 – DGPS *Emlid Reach RS2*. ..... 42
Figura 22 – Aspeto geral do *Agisoft Metashape Pro 1.6.4*. ..... 43
Figura 23 – Aspeto geral do *CloudCompare v2.12 alpha*. ..... 44
Figura 24 – Aspeto geral do do *addIn GCD* no *ArcMap 10.7.1*. ..... 45
Figura 25 – Metodologia. ..... 45
Figura 26 – Localização dos GCPs nas três áreas de monitorização. ..... 50
Figura 27 – *Workflow* geral do processamento SfM-MVS. ..... 51
Figura 28 – Parâmetros para *DoD* no *Geomorphic Change Detection*. ..... 54
Figura 29 – Enquadramento do concelho de Torres Vedras. ..... 57
Figura 30 – Arriba alta, a norte da Ponta da Vela. ..... 58
Figura 31 – Condições fisiográficas do litoral de Torres Vedras. ..... 59
Figura 32 - Diversidade litológica. Praia Formosa e Amoeiras. ..... 60

FIGURA 33 – FALHA INVERSA JUNTO AO FAROL DO PORTO DE PESCA DA ASSENTA. ..... 61
FIGURA 34 – LITOLOGIA E ESTRUTURA DA FAIXA LITORAL DO CONCELHO DE TORRES VEDRAS..... 62
FIGURA 35 – DESLIZAMENTO ROTACIONAL. ..... 63
FIGURA 36 – DESLIZAMENTO TRANSLACIONAL..... 63
FIGURA 37 – FLUXO DE DETRITOS..... 63
FIGURA 38 – QUEDA DE BLOCOS/DETRITOS E DESLIZAMENTO SOBRE A FACE DA ARRIBA..... 63
FIGURA 39 – TIPOS DE MOVIMENTOS DE VERTENTE MAIS FREQUENTES NA FAIXA LITORAL DE TORRES VEDRAS. 64
FIGURA 40 – OCORRÊNCIAS SIGNIFICATIVAS POR DATA EXATA E POR DATA PROVÁVEL. ..... 65
FIGURA 41 – ÁREA DE MONITORIZAÇÃO: MODELO TEXTURIZADO DA PRAIA DA MEXILHOEIRA. ..... 69
FIGURA 42 – EXSURGÊNCIA E EROSÃO BASAL DAS CAMADAS ARGILOSAS NA PRAIA DA MEXILHOEIRA..... 70
FIGURA 43 – ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO DA PRAIA DA MEXILHOEIRA. ..... 71
FIGURA 44 – EROSÃO BASAL COM FORMAÇÃO DE SAPA NAS ROCHAS DE MENOR RESISTÊNCIA. ..... 72
FIGURA 45 – ALTERAÇÕES NA BASE DA ARRIBA DA PRAIA DA MEXILHOEIRA..... 72
FIGURA 46 – EXEMPLO DA VARIAÇÃO DA PERMEABILIDADE DA ARRIBA EM FUNÇÃO DA LITOLOGIA E PROCESSOS DE ESCORRÊNCIA SUBSUPERFICIAL ASSOCIADOS. ..... 73
FIGURA 47 – DILATAÇÃO DE FENDA E QUEDA DE BLOCO NA PRAIA DA MEXILHOEIRA..... 74
FIGURA 48 – PERFIL TOPOGRÁFICO TRANSVERSAL À CRISTA DA ARRIBA NA PRAIA DA MEXILHOEIRA..... 75
FIGURA 49 – BLOCOS INSTÁVEIS..... 75
FIGURA 50 – ÁREA DE MONITORIZAÇÃO: MODELO TEXTURIZADO DA PRAIA DA VIGIA..... 76
FIGURA 51 – ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO DA PRAIA DA VIGIA. ..... 77
FIGURA 52 – QUEDA DE BLOCO. ..... 78
FIGURA 53 – PROCESSOS EROSIVOS NA PRAIA DA VIGIA..... 78
FIGURA 54 – ÁREA DE MONITORIZAÇÃO: MODELO TEXTURIZADO DA ÁREA DO PORTO DE PESCA DA ASSENTA. 79
FIGURA 55 – ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO DO PORTO DE PESCA DA ASSENTA. ..... 80
FIGURA 56 – PROCESSOS EROSIVOS NO PORTO DE PESCA DA ASSENTA..... 81
FIGURA 57 – FOTOCOMPARAÇÃO..... 81
FIGURA 58 – PROCESSOS EROSIVOS NA PRAIA DAS CONCHAS..... 82
FIGURA 59 – POSSÍVEL DESLIZAMENTO ROTACIONAL DE GRANDES DIMENSÕES. ..... 83
FIGURA 60 – PROCESSOS EROSIVOS NO MIRADOURO DA FORMOSA..... 83
FIGURA 61 – COMPARAÇÃO VISUAL ENTRE ORTOMOSAICOS. ..... 84
FIGURA 62 – PROCESSOS EROSIVOS JUNTO AO ESTACIONAMENTO DE PORTO BARRIL..... 85
FIGURA 63 – RECUO DA ARRIBA NA ESTRADA DE ACESSO A PORTO BARRIL. ..... 86
FIGURA 64 – DIFERENÇAS VERIFICADAS NA PRAIA DA MEXILHOEIRA ENTRE 01/11/20 E 27/12/20..... 87

FIGURA 65 – DIFERENÇAS VERIFICADAS NA PRAIA DA MEXILHOEIRA ENTRE 27/12/20 E 13/02/21. ..... 88
FIGURA 66 – DIFERENÇAS VERIFICADAS NA PRAIA DA MEXILHOEIRA ENTRE 13/02/21 E 22/02/21. ..... 88
FIGURA 67 – DIFERENÇAS VERIFICADAS NA PRAIA DA MEXILHOEIRA ENTRE 20/03/21 E 02/04/21. ..... 89
FIGURA 68 – DIFERENÇAS VERIFICADAS NA PRAIA DA MEXILHOEIRA ENTRE 02/04/21 E 18/04/21. ..... 89
FIGURA 69 – DIFERENÇAS VERIFICADAS NA PRAIA DA MEXILHOEIRA ENTRE 01/11/20 E 18/04/21. ..... 89
FIGURA 70 – DIFERENÇAS VERIFICADAS NA PRAIA DA VIGIA ENTRE 17/12/20 E 13/02/21. ..... 90
FIGURA 71 – DIFERENÇAS VERIFICADAS NA PRAIA DA VIGIA ENTRE 13/02/21 E 22/02/21. ..... 90
FIGURA 72 – DIFERENÇAS VERIFICADAS NA PRAIA DA VIGIA ENTRE 17/12/20 E 18/04/21. ..... 91
FIGURA 73 – DIFERENÇAS VERIFICADAS NA PRAIA DA VIGIA ENTRE 23/07/18 (COSMO) E 18/04/21. ..... 91
FIGURA 74 – DIFERENÇAS VERIFICADAS NO PORTO DA ASSENTA ENTRE 21/03/21 E 18/04/21. ..... 92
FIGURA 75 – DIFERENÇAS VERIFICADAS NO PORTO DA ASSENTA ENTRE 18/04/21 E 29/04/21. ..... 92
FIGURA 76 – DIFERENÇAS VERIFICADAS NO PORTO DE PESCA DA ASSENTA ENTRE 05/05/18 (COSMO) E 18/04/21..... 93
FIGURA 77 – DIFERENÇAS VERIFICADAS ENTRE 01/11/20 E 18/04/21 NA PRAIA DA MEXILHOEIRA (C2M). . 94
FIGURA 78 – DIFERENÇAS VERIFICADAS ENTRE 01/11/20 E 18/04/21 NA PRAIA DA MEXILHOEIRA (M3C2). 95
FIGURA 79 – DIFERENÇAS VERIFICADAS ENTRE 17/12/20 E 18/04/21 NA PRAIA DA VIGIA (M3C2)..... 95
FIGURA 80 – DIFERENÇAS VERIFICADAS ENTRE 21/03/21 E 18/04/21 NO PORTO DA ASSENTA (M3C2). .... 96
FIGURA 81 – INTERPRETAÇÃO DA EVOLUÇÃO ENTRE 21/03/21 E 18/04/21, NO PORTO DA ASSENTA (NUVEM DE PONTOS + M3C2). ..... 96
FIGURA 82 – PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MONITORIZAÇÃO DE ARRIBAS POTENCIALMENTE INSTÁVEIS.. 101

# Índice de Tabelas

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens da técnica *Structure-from-Motion*. ..... 23
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens da aplicação de UAS. ..... 27
Tabela 3 – Principais processos erosivos que ocorrem na costa rochosa. ..... 32
Tabela 4 – Escalas de velocidade de movimentos de vertente e capacidade de resposta. ..... 34
Tabela 5 – Classificação de movimentos de vertente. ..... 35
Tabela 6 – Modelos digitais utilizados. ..... 39
Tabela 7 – Materiais utilizados. ..... 40
Tabela 8 – Áreas de estudo: áreas-exemplo e áreas de monitorização. ..... 46
Tabela 9 – Dados da Estação de Referência utilizada. ..... 50
Tabela 10 – Comparação entre os MDS, por áreas de monitorização. ..... 55
Tabela 11 – Comparação tridimensional, por áreas de monitorização. ..... 56
Tabela 12 – Tempestades que afetaram Portugal durante o período em estudo. ..... 65
Tabela 13 – Dados dos levantamentos aéreos e do processamento fotogramétrico, por área de monitorização. ..... 119
Tabela 14 – Coordenadas dos GCPs na área da Praia da Mexilhoeira. ..... 120
Tabela 15 – Coordenadas dos GCPs na área da Praia da Vigia. ..... 120
Tabela 16 – Coordenadas dos GCPs na área do Porto de Pesca da Assenta. ..... 121

# Índice de Gráficos

Gráfico 1 – Temperatura diária (ºC). ..... 66
Gráfico 2 – Precipitação acumulada (mm). ..... 66
Gráfico 3 – Velocidade do vento (km/h)..... 67
Gráfico 4 – Altura máxima das ondas (m) registada pela boia *Nazaré costeira*. ..... 68
Gráfico 5 – Altura significativa das ondas (m) segundo modelo numérico..... 68

# Lista de abreviaturas e siglas

C2C ..... *Cloud-to-Cloud*

C2M ..... *Cloud-to-Model*

CMTV ..... Câmara Municipal de Torres Vedras

DEM ..... *Digital Elevation Model*

DGPS ..... *Differential Global Positioning System*

DoD ..... *DEMs of Difference*

GCP ..... *Ground Control Point*

GCS ..... *Ground Control Station*

GNSS ..... *Global Navigation Satellite System*

GPS ..... *Global Positioning System*

LiDAR ..... *Light Detection and Ranging*

M3C2 ..... *Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison*

MDS ..... *Modelo Digital de Elevação*

MVS ..... *Multi-View StereoScan*

NTRIP ..... *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*

PPK ..... *Post-Processed Kinematic*

RGB ..... *Red, Green and Blue*

RTCM ..... *Radio Technical Commission for Maritime Services*

RTK ..... *Real Time Kinematic*

SfM ..... *Structure from Motion*

TLS ..... *Terrestrial Laser Scanning*

UAS ..... Unmanned Aircraft System

# Introdução

A zona costeira é extremamente ativa e nela convergem diversos agentes geodinâmicos, que atuam nos demais sistemas litorais que a caracterizam, como as dunas, as praias ou as arribas, contribuindo assim para a sua constante alteração morfológica (FIGURA 1).

Difícil de definir e de estabelecer fronteiras, o litoral é um espaço que sofre constantes alterações, sendo constituído pelas áreas emersas e submersas onde processos marinhos e terrestres se entrecruzam (RAMOS-PEREIRA, 2008), havendo troca de energia e de fluxos. Segundo SILVA (2007, P. 22), a essência do litoral "*decorre sobretudo do contacto entre o mar e a terra e das características ambientais específicas que esse contacto induz*".

É precisamente no espaço litoral que se verifica uma "*intensa concentração demográfica e de atividades económicas, os fluxos turísticos sazonais, a ocupação desordenada do território, o desrespeito pela capacidade de carga dos locais de risco* (…)", e que leva a situações de desequilíbrio dos ecossistemas, ao aumento da perigosidade associada aos riscos naturais, bem como da vulnerabilidade dos elementos expostos (ANPC, 2010).

Esta ocupação antrópica foi, e por vezes ainda o é, desprovida de qualquer análise do risco associado à erosão costeira e à própria evolução natural da paisagem, quer por ocupações ilegais ao longo do tempo, como por eventuais descuidos no licenciamento.

Na ótica do ordenamento do território, a conceção do litoral baseia-se num espaço delimitado e imobilista, que subentende uma dinâmica fraca (RAMOS-PEREIRA, 2008) e que perdura em horizontes temporais demasiadamente largos. No entanto, considerando os riscos presentes, como galgamentos costeiros, cheias, inundações por tsunamis ou temporais e movimentos de vertente, compreende-se que as alterações naturalmente forçadas são uma constante que ultrapassa o período de vigência dos instrumentos de gestão territorial (10 anos, em regra), de âmbito municipal e setorial.

Uma das formas litorais mais comuns são as arribas, que ocorrem em quase ¾ do litoral do mundo (EMERY & KUHN, 1982). Em Portugal continental (FIGURA 1C), dos 835 quilómetros de extensão de costa (variável com a escala), cerca de 443 km (53%) apresentam esta morfologia (MARQUES, 2009).




Figura 1 – Sistemas litorais distintos: a) costa alta e rochosa (Sesimbra); b) costa baixa e arenosa com sistema dunar (Quiaios); c) costa de arriba em Portugal continental.

Segundo o regime jurídico da Reserva Ecológica Nacional (REN) (DECRETO-LEI N.º 124/2019, DE 28 DE AGOSTO) as arribas constituem "*uma forma particular de vertente costeira abrupta ou com declive elevado, em regra geral talhada em materiais coerentes pela ação conjunta dos agentes morfogenéticos marinhos, continentais e biológicos*".

Neste trabalho, a terminologia de arriba que adotamos refere-se, portanto, a um desnível abrupto face ao mar, composto por material de rocha consolidada que pode ser resistente ou branda, sendo que a sua resistência determinará a evolução rápida ou lenta da costa e da própria arriba.

Nas arribas confluem vários processos erosivos que contribuem para a evolução do seu perfil. Um dos processos que tem especial importância são os movimentos de massa que ocorrem nas vertentes. Isto é, todo o conjunto de movimentações que ocorrem ao longo de uma vertente e que envolve a deslocação de materiais (TEIXEIRA, 2005).

Em Portugal, o número de sinistros por causas geomorfológicas em ambiente costeiro, dos quais resultam vítimas ou prejuízos, é considerável. Nas praias do Algarve, entre 1998 e 2010 pelo menos seis pessoas perderam a vida e sete ficaram feridas, enquanto no litoral Oeste, em Peniche, morreram três pessoas no mesmo local em duas ocorrências distintas, em 2003 e 2005 e, em 2011, também em Peniche, a queda de um bloco provocou ferimentos graves em três pessoas e ligeiros noutras três (GTL, 2014). Em março de 2018, a queda de pedras numa praia sem aptidão para uso balnear, em Sintra, provocou um morto e um ferido ligeiro (OBSERVADOR, 2018).

No litoral de Torres Vedras, na Praia da Mexilhoeira (FIGURA 2), a 15 de agosto de 2020 ocorreu um desabamento que, apesar de não ter causado danos, ocorreu durante o dia e com banhistas nas proximidades[1] (FIGURA 3). Esta ocorrência serviu como mote de partida para delinear um projeto que permitisse o acompanhamento da sua evolução.

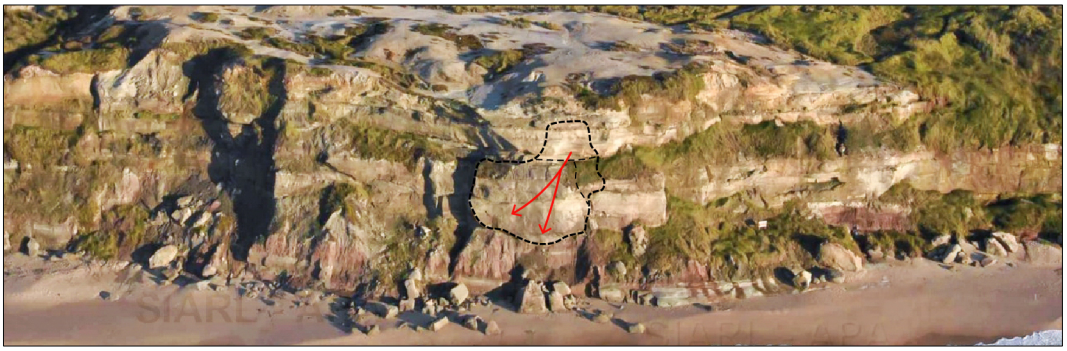



Figura 2 – Arriba da Praia da Mexilhoeira (16 de novembro de 2016) ©SIARL.




Figura 3 – Arriba da Praia da Mexilhoeira após desabamento (31 de agosto de 2020).

[1] *Derrocada na Praia da Mexilhoeira* https://www.onfm.pt/2020/08/15/derrocada-na-praia-da-mexilhoeira/

Tanto para a compreensão da evolução das arribas como para a aplicação em estudos de prevenção de riscos e de ordenamento do território em litoral de arriba, um acompanhamento geomorfológico recorrente dessas vertentes é fundamental, sobretudo em áreas cuja suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa em vertentes é elevada e se entrecruza com a vulnerabilidade dos elementos expostos. Nesse domínio, atualmente dispomos de ferramentas acessíveis e de baixo custo com capacidade de gerar resultados fiáveis que permitem identificar problemas e contribuir para possíveis soluções (LETORTU ET AL., 2018; LUCIEER ET AL., 2014; ROSSI ET AL., 2018; XU ET AL., 2020).

Assim, este trabalho desenvolve uma proposta metodológica, aplicada a nível municipal, que permite um acompanhamento acessível e frequente da evolução de vertentes costeiras potencialmente instáveis. A metodologia seguida foca-se no ambiente costeiro, contudo é possível aplicá-la a qualquer outra vertente terrestre que revele condições de instabilidade. Esta proposta tem como finalidades, essencialmente:

*i)* a possibilidade de verificar, em segurança, a presença de sinais de instabilidade, antecipando eventos perigosos e salvaguardando pessoas e bens;

*ii)* a aquisição de dados atualizados e precisos (modelos digitais e ortofotografias) que permite acompanhar a evolução dos espaços;

*iii)* apurar as alterações ocorridas entre um intervalo temporal, permitindo identificar os movimentos de vertente espacialmente e, consoante o plano de monitorização, temporalmente.

# Capítulo I – Enquadramento

No âmbito do estágio realizado na Área de Planeamento da Divisão de Planeamento Estratégico e Territorial da Câmara Municipal de Torres Vedras, foi possível tomar contacto com as diversas temáticas que constituem o Plano Diretor Municipal (PDM), sobretudo ao nível das plantas de ordenamento e de condicionantes, onde se centrou grande parte do contributo na elaboração de cartografia.

Sendo o concelho de Torres Vedras marcado por uma forte presença do risco de movimentos de massa em vertentes e, incontornavelmente, as arribas não sendo exceção, este é o tema que motiva o presente trabalho. Nesse sentido, procuramos contribuir através da aplicação de uma metodologia que permite o acompanhamento da evolução das arribas, explorando alguns casos observados no litoral de Torres Vedras e, especificamente, três casos de estudo que foram monitorizados regularmente.

Assim, o principal objetivo consiste em fundamentar uma proposta metodológica, facilmente aplicável a nível municipal, através de deteção remota com recurso a uma aeronave não tripulada de baixo custo (UAS), aliada à técnica de fotogrametria *Structure-from-Motion with Multi-View Stereo*. A partir dessa metodologia e assente numa prática de monitorização do litoral, poderemos obter vários resultados, entre os quais:

- a atualização cartográfica;
- contributos para o planeamento municipal, através da sua aplicação no ordenamento do território;
- a interpretação de processos erosivos que ocorrem nesse meio, através de fotointerpretação e modelação 3D;
- a inspeção detalhada e tridimensional do perfil de arribas, permitindo verificar em segurança para o operador a existência de sinais de instabilidade;
- a deteção de alterações (*change detection*) 2.5D e 3D, acompanhando a evolução geomórfica das arribas e averiguando a eventual influência das condições meteorológicas e de ondulação.

## 1.1. Monitorização do litoral

A monitorização das zonas costeiras consiste no acompanhamento regular das suas dinâmicas, tendências e alterações geomorfológicas ao longo do tempo. Isto pode ser feito através de métodos diretos (caracterização e registo *in situ*, fotocomparação e fotointerpretação) e indiretos (deteção remota) (PENACHO ET AL., 2019). A obtenção de dados em quantidade e qualidade permite ampliar o conhecimento sobre a evolução do espaço litoral (eg. JAUD ET AL., 2019), os seus comportamentos e identificar potenciais problemas. Pode, ainda, contribuir para inventários de movimentos de vertente, bem como para o desenvolvimento de estudos e estratégias de planeamento e ordenamento do território, com uma visão assente na prevenção de riscos.

Uma monitorização contínua aparenta ser utópica face aos recursos envolvidos. Porém, atualmente, verificamos que a obtenção de informação é mais rápida, fácil e, eventualmente, barata e com menos recursos dependendo, claro, das técnicas, propósitos e fins pretendidos. Não obstante, a aquisição de dados no presente é fundamental para fazer um acompanhamento regular que poderá, ainda, contribuir para antever possíveis acidentes geomorfológicos no futuro e evitar danos, tornando este tipo de investimento numa mais-valia enquanto ação indireta de defesa costeira.

Assim, deve ser traçado um projeto equilibrado que vá ao encontro das necessidades e dos recursos disponíveis, considerando desde logo a frequência dos levantamentos que é condicionada pela área em análise, o equipamento utilizado e o orçamento envolvido; e as áreas em que faz sentido implementar tal projeto. Por exemplo, em áreas de baixa ocupação, o investimento será apenas justificado enquanto forma de aprofundar o estudo e acompanhar a evolução natural dos sistemas; enquanto que em áreas onde se estabelecem proveitos residenciais, agrícolas ou industriais, será mais indicado executar um programa de monitorização contínuo, prudente e minucioso, de modo a permitir uma avaliação consistente dos riscos nesses espaços (HENRIQUES, 2006).

O avanço e aperfeiçoamento tecnológico e computacional a que assistimos nas últimas décadas tem permitido abrir um leque de escolhas quanto a aplicações e técnicas de monitorização do litoral e, especificamente, na monitorização de movimentos de vertente.

Os métodos a utilizar deverão estar relacionados ao objetivo da investigação que, por sua vez, se interliga com as condições da área de estudo e com os recursos – técnicos e humanos – disponíveis. Deverá, portanto, ser considerado o custo, a operacionalização dos equipamentos, o período de monitorização e a geografia da área do levantamento.

São várias as técnicas de monitorização ou de quantificação da erosão costeira: a fotointerpretação (Penacho et al., 2013), o mapeamento cartográfico (Pérez-Alberti & Trenhaile, 2015), a fotografia aérea (Marques, Matildes, et al., 2013), as imagens de satélite (Pardo-Pascual et al., 2012), DGPS (Castelle et al., 2017), o LiDAR aéreo (ALS) e terrestre (TLS) (Earlie et al., 2015; Kuhn & Prüfer, 2014) ou a técnica *Structure-from-Motion with Multi-View Stereo* (SfM-MVS) (Ružić et al., 2014; Turner et al., 2016; Horacio et al., 2019) (Figura 4). Naturalmente, cada método apresenta as suas próprias vantagens e desvantagens, prendendo-se, geralmente, com a escala, a resolução, precisão e preço da aquisição de dados ou de equipamentos.

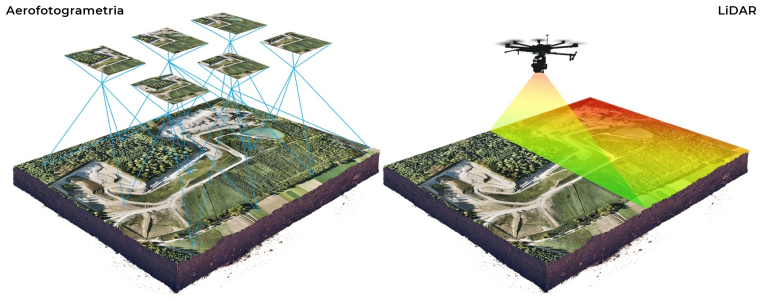



Figura 4 – Aerofotogrametria *vs.* LiDAR.
Fonte: Wingtra (2021)

Neste trabalho, além de fotointerpretação, é empregue a técnica de deteção remota com recurso a um *drone* de baixo custo para a aquisição de dados, aliado à técnica (aero)fotogramétrica SfM-MVS para o seu processamento que, através desses resultados, permitirá interpretar processos e identificar alterações topográficas.

### 1.1.1. *Structure-from-Motion* (SfM) *with Multi-View Stereo* (MVS)

A técnica de *Structure-from-Motion* (SfM) (ou *estrutura de movimento*) emergiu nas últimas décadas com o avanço da visão computacional nos anos 90 (SPETSAKIS & ALOIMONOS, 1991; BOUFAMA ET AL., 1993; SZELISKI & KANG, 1994), após a evolução de algoritmos de correspondência automática (FÖRSTNER, 1986; HARRIS & STEPHENS, 1988).

A SfM opera sob os princípios básicos da fotogrametria tradicional, na medida em que a estrutura 3D é obtida a partir da sobreposição de imagens de várias perspetivas (FONSTAD ET AL., 2013; MICHELETTI ET AL., 2014; MICHELETTI ET AL., 2015). Contudo, a geometria interna da câmara bem como a sua posição e orientação são determinadas automaticamente, sem necessidade de as especificar previamente ou mesmo de incluir pontos de controlo (WESTOBY ET AL., 2012), tornando o processo bastante mais rápido e facilitado.

De uma forma geral, esta técnica consiste no processo de estimar e reconstituir a estrutura tridimensional (3D) de uma superfície, cena ou objeto, a partir da sobreposição de fotografias 2D de várias perspetivas, através da combinação de pontos comuns em cada imagem, que são identificados automaticamente por *software* próprio (*Agisoft Metashape*, *Pix4Dmapper*, *ArcGIS Drone2Map*, *3DF Zephyr*, *RealityCapture*, *MicMac*, etc.), resultando em nuvens de pontos esparsas (*sparse clouds*).

Estas *sparse clouds*, conjugadas com algoritmos de visão computacional *Multi-View Stereo* (MVS), são intensificadas e geram uma reconstituição densa: *dense point cloud* (FURUKAWA & PONCE, 2010; ROTHERMEL & WENZEL, 2012; MICHELETTI ET AL., 2015).

A partir da nuvem de pontos densa, que permite replicar a geometria de qualquer objeto num modelo tridimensional, é ainda possível gerar ortomosaicos e modelos digitais de superfície georreferenciados (FIGURA 5).

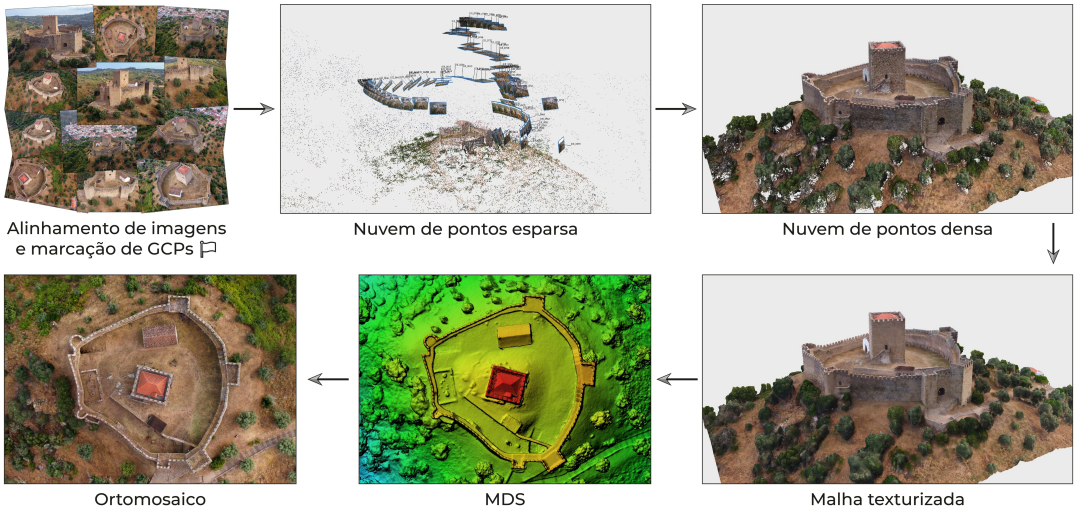



Figura 5 – Processamento SfM-MVS.

"*Basically, SfM-MVS photogrammetry transforms pixels in 2D images to 3D points in a point cloud (3D dataset with X, Y and Z coordinates and RGB values for every point in the cloud)* (…)."

GÓMEZ-GUTIÉRREZ & GONÇALVES (2020, P. 9)

A eficácia da aplicação desta técnica em levantamentos aéreos depende de vários fatores e implicações:

- Requisito mínimo de o mesmo *keypoint* aparecer em três fotografias. É recomendável obter um número de imagens estimado como suficiente de forma a otimizar o número de correspondência de *keypoints* (WESTOBY ET AL., 2012).
- Resolução do sensor; sendo que, em áreas de pequena dimensão, uma câmara convencional tem resolução suficiente para determinar uma textura detalhada da superfície (FONSTAD ET AL., 2013).
- A existência de sombras. A nebulosidade pode ser mais importante do que a hora do dia, de forma a evitar contrastes fortes (JAUD ET AL., 2019).
- A combinação de imagens captadas "em movimento", ou seja, de várias perspetivas, incluindo *nadir* (verticais, 90°) e *off-nadir* (oblíquas), que possibilita apurar uma melhor definição das formas e superfícies (Jaud, Letortu, et al., 2019).
- A sobreposição (*overlap*) >60% transversalmente e >80% longitudinalmente, de forma a cobrir e reconhecer um número de pontos determinante para proceder

ao alinhamento das imagens (QIN ET AL., 2016) e tornar as superfícies espacialmente contínuas.

- A utilização de *Ground Control Points* (GCPs) – *pontos de controlo no terreno*. Não é obrigatório para o funcionamento desta técnica, mas é o que determinará os valores *x*, *y* e *z* dos modelos num sistema de coordenadas de referência, tornando os resultados mais precisos e inseridos num "mundo real" (WESTOBY ET AL., 2012).

A técnica SfM é considerada uma aposta segura e capaz de gerar modelos rigorosos, com dados de qualidade e de resolução comparável ao LiDAR e à fotogrametria tradicional, mas de fácil utilização e menos dispendiosa (FONSTAD ET AL., 2013).

A TABELA 1 elenca alguns benefícios e limitações da aplicação desta técnica:

**Tabela 1 – Vantagens e desvantagens da técnica *Structure-from-Motion*.**

| Vantagens | Desvantagens |
|---|---|
| Técnica de baixo custo* | Levantamento manual de pontos de controlo é necessário para determinar a precisão dos resultados |
| Combinação com a utilização de *drones*, que permite alta cobertura dos cenários | Tempo de processamento dos dados recolhidos pode ser demorado* |
| Produz informação topográfica 2D, 2.5D e 3D espacialmente contínua | Pode ser necessário algum conhecimento avançado de métodos de diferenciação topográfica, por exemplo, para gerar mapas de erosão |
| Informação detalhada (por ex. 1-3 cm/pixel) | Não penetra a copa das árvores ou vegetação densa |
| Tempo requerido para a obtenção de dados é reduzido | |
| Técnica acessível. Treino mínimo para gerar modelos 3D de boa qualidade visual | |

Fonte: Adaptado de WESTOBY ET AL. (2018) e VIDAL (2013)

*Depende do sensor utilizado, do preço do *software* de processamento e da quantidade-qualidade de dados que pode implicar uma *workstation* dispendiosa para o processamento da informação.

Para a obtenção de levantamentos 2D e 2.5D, o varrimento deverá ser focado essencialmente na captação de fotografias verticais (*nadir* – ângulo de 90º ou muito próximo, como na FIGURA 6), enquanto no caso 3D é essencial fazer um levantamento a partir de perspetivas verticais, oblíquas e horizontais (*off-nadir*, FIGURA 7) de forma a captar todas as superfícies de vários ângulos.



Figura 6 – Fotografia aérea *nadir* (90º).



Figura 7 – Fotografia aérea *off-nadir* (35º).

A descrição em detalhe do funcionamento desta técnica pode ser consultada em D. GONÇALVES (2020) e SMITH ET AL. (2015).

#### 1.1.1.1. *Groud Control Points* (GCPs) – Pontos de controlo

A utilização de *ground control points* (GCP) – ou *pontos de controlo no terreno* – permite realizar a orientação, correção e alinhamento rigoroso das fotografias aéreas.

Estes pontos, preferencialmente, deverão ser fixos, bem materializados e visíveis nas imagens captadas. Usualmente, são utilizadas marcas ou plataformas (alvos) com uma simbologia contrastante de modo a serem facilmente identificadas nas fotografias. Mas, nessa impossibilidade, podem ser utilizadas tampas de saneamento, rochas facilmente identificáveis ou, com menor precisão e dependendo da escala de trabalho, interseções de trilhos ou manchas em vegetação (GOMES, 2018) (FIGURA 8 E FIGURA 9).

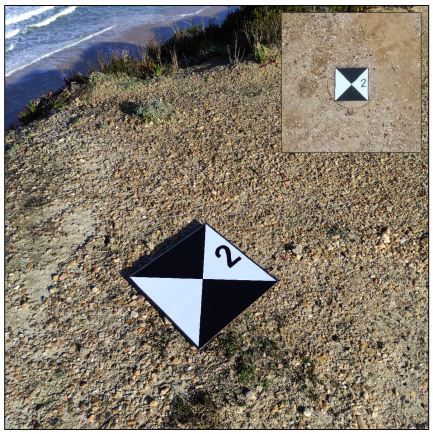



Figura 8 – Plataformas contrastantes (GCP).



Figura 9 – Vegetação e tampa de saneamento utilizadas como GCP.

Segundo KÜNG ET AL. (2012), utilizando imagens de baixa altitude, mas descartando qualquer GCP, a precisão é de cerca de 2 metros. Porém, ao atribuir alguns GCPs, pode ser alcançada uma precisão de <5-20 cm.

VILLANUEVA & BLANCO (2019) faz uma experiência relativa ao número de GCPs e respetiva distribuição, verificando uma tendência de decréscimo de erros (RMSE – *Root Mean Square Error*/SCE – *Surface Checkpoint Error*) à medida que o número de GCPs aumenta e mais distribuídos se encontram, otimizando significativamente a qualidade dos dados produzidos.

No caso do posicionamento de GCPs em ambiente de arribas, o levantamento de coordenadas pode ser desafiante e limitado devido a condicionantes como o acesso ao sopé da arriba, à presença do mar, a alterações na superfície (por exemplo, a submersão ou cobertura de rochas utilizadas como GCPs), ou o grau de declive acentuado das vertentes (que, por vezes, é impeditivo para medições na face das arribas).

#### 1.1.1.2. Aeronaves Não Tripuladas (UAS)

A deteção remota (*remote sensing*) consiste na aquisição de informação de um objeto, cena ou área, a partir de sensores instalados em plataformas movíveis no espaço, sejam aéreas ou terrestres, sem que exista contacto físico entre o próprio sensor e o alvo em estudo (TOMÁS ET AL., 2016). Um dos meios de deteção remota são as denominadas aeronaves não tripuladas (UAS – *unmanned aircraft systems*).

Nos últimos anos, os UAS, veículos aéreos não tripulados (VANT), aeronaves pilotadas remotamente (RPA) ou, comumente denominados de *drones*, têm demonstrado uma grande eficiência quanto à sua aplicabilidade em diversos domínios civis (STARK ET AL., 2021), como: o mapeamento geológico (JOHNSON ET AL., 2014) e mineração (NEX & REMONDINO, 2014); arqueologia (BARBA ET AL., 2019; RINAUDO ET AL., 2012); incêndios (ZARAGOZA ET AL., 2017); agricultura (GRENZDÖRFFER ET AL., 2008); silvicultura (BERNI ET AL., 2009); mapeamento cadastral (CRAMER ET AL., 2013); análise de inundações (BUFFON ET AL., 2018), deteção e monitorização de movimentos de vertente (XU ET AL., 2020); ou levantamentos topográficos e monitorização costeira (GONÇALVES & HENRIQUES, 2015;

IERODIACONOU ET AL., 2016; JAMES ET AL., 2017; GÓMEZ-GUTIÉRREZ & GONÇALVES, 2020; HORACIO ET AL., 2019; GÓMEZ-PAZO & PÉREZ-ALBERTI, 2021); entre outros.

Esta tipologia de *drones*, geralmente de pequenas dimensões e de custo relativamente baixo, dependendo dos modelos, podem acoplar diversos tipos de sensores e de captar imagens de alta resolução, recolher informação topográfica de alta qualidade e fazer levantamentos de cenários entre, aproximadamente, <1 a 5 quilómetros, sendo considerados uma alternativa viável e competitiva face às aeronaves tradicionais dentro destas escalas (NEX & REMONDINO, 2014).

Dependendo dos componentes constituintes do *drone*, a carga útil, autonomia de voo, tipo de plataforma e grau de automatização, estas aeronaves para fins geomáticos podem custar entre 1 000€ e 50 000€ (NEX & REMONDINO, 2014). Em contrapartida, o preço do conjunto de equipamentos a utilizar em levantamentos aéreos LiDAR situa-se entre as dezenas e as centenas de milhares de euros (WINGTRA, 2021).

Importa salientar que com a utilização de *drones* de asa fixa (FIGURA 10), é possível cobrir áreas de maior dimensão e em menor tempo, sendo mais eficientes em termos de consumo de bateria, seguindo um trajeto linear (como a linha de costa). No entanto, os multirotores (FIGURA 11) são mais manobráveis, versáteis e portáteis, sendo mais adequados para a aquisição de imagens oblíquas e, por isso, ideais para levantamentos de pequenos a médios troços de arribas ou outras superfícies íngremes (GÓMEZ-GUTIÉRREZ & GONÇALVES, 2020).



Figura 10 – *Drone* de asa fixa.
eBee X ©SENSEFLY.



Figura 11 – *Drone* quadricóptero.
DJI Phantom 4 RTK ©DJI.

Como qualquer ferramenta ou equipamento, os *drones* apresentam um conjunto de prós e contras que deverão ser ponderados, dependendo da aplicação pretendida, face aos outros meios disponíveis. A TABELA 2 aponta alguns dos pontos positivos e negativos da utilização de *drones* neste contexto:

**Tabela 2 – Vantagens e desvantagens da aplicação de UAS.**

| Vantagens | Desvantagens |
|---|---|
| Custos de operacionalidade baixos para trabalhos de grande pormenor, face a outros recursos | Possível limitação a equipamento fotográfico de menor resolução, devido ao peso e dimensões da aeronave |
| Baixa necessidade de recursos humanos | Cobertura de áreas de menor dimensão por cada missão, comparativamente a aeronaves tripuladas tradicionais |
| Fotografias de elevada resolução | Distância de voo limitada à potência do sinal |
| Capacidade de captar imagens verticais e oblíquas, próximas do alvo, e de áreas oclusas de um ponto de vista terrestre | Fraca resistência a ventos fortes e inoperacionalidade com chuva |
| Autonomia***** | Autonomia* |
| Flexibilidade e prontidão | |
| Automatização/planeamento de voos (<1h) | |
| Rapidez no planeamento e operacionalização | |
| Possibilidade de dispor sistema RTK/PPK incorporado, que descarta a utilização de GCPs | |
| Segurança, por ser controlado remotamente | |

Fonte: Adaptado de JAUD ET AL. (2019) e WESTOBY ET AL. (2018)

*****Depende do tipo de *drone*. Geralmente <30 minutos (anunciados) por bateria, no caso de multirotores. Consoante a extensão e complexidade da área de trabalho, pode ou não ser suficiente.

Note-se que a pilotagem deste(s) aparelho(s) carece(m) de formação, registos e autorizações em conformidade com a legislação portuguesa e europeia, que pode ser consultada nos sites da *Autoridade Nacional da Aviação Civil* (ANAC) e da *Autoridade Aeronáutica Nacional* (AAN).

### 1.1.2. Change Detection

Como referido, a técnica de SfM-MVS permite gerar nuvens de pontos e modelos digitais, dando-nos uma representação gráfica do cenário em 3 e 2.5 dimensões, passíveis de desenho em CAD (*Computer-Aided Design*), manipulação de dados e deteção de alterações em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica). A deteção de alterações – *change detection* – pode ser executada em 2D (imagens pancromáticas ou espetrais e vetores 2D), 2.5D (DEMs) e 3D (nuvens de pontos e malhas) (GÓMEZ-GUTIÉRREZ & GONÇALVES, 2020), comparando o mesmo cenário em períodos diferentes.

A **comparação de modelos 2.5D** (FIGURA 12) consiste na subtração entre dois modelos digitais de elevação ou superfície (DEMs/DSMs) – técnica denominada de *DEMs of Difference* (***DoD***) (WHEATON ET AL., 2009) – resultando na identificação das áreas de erosão e de deposição através da deteção de alterações no volume entre modelos digitais. Essa subtração poderia ser realizada, por exemplo, com a ferramenta "*Raster Calculator*" através do *ArcMap* ou *QGIS*, no entanto o *software* utilizado neste trabalho (*Geomorphic Change Detection*) permite diferentes métodos de análise e é capaz de gerar um resultado representativo de apenas as áreas onde ocorreram as alterações, bem como fornecer automaticamente um relatório detalhado e gráficos dessas alterações.

Neste contexto, ao contrário da subtração simples entre modelos digitais, são possíveis várias abordagens: a definição de um valor mínimo de deteção ($_{min}$LoD), propagação de erros e por intervalo de confiança (WHEATON ET AL., 2009).

Esta técnica é de fácil aplicação e interpretação, mas pode apresentar algumas limitações, como a utilização em paisagens cujas superfícies topográficas são complexas, tais como: *i)* algumas arribas, em que a partir de uma perspetiva *top-view*, se a perda de massa na vertente for num patamar inferior e recuado à crista, o método não identifica essas alterações; *ii)* a simplificação da topografia real, não estimar a distância na direção normal; *iii)* ser muito sensível a erros (GÓMEZ-GUTIÉRREZ & GONÇALVES, 2020). Esta sensibilidade a erros leva a que pequenos deslocamentos laterais entre MDS possam resultar em grandes diferenças verticais (COOK, 2017).

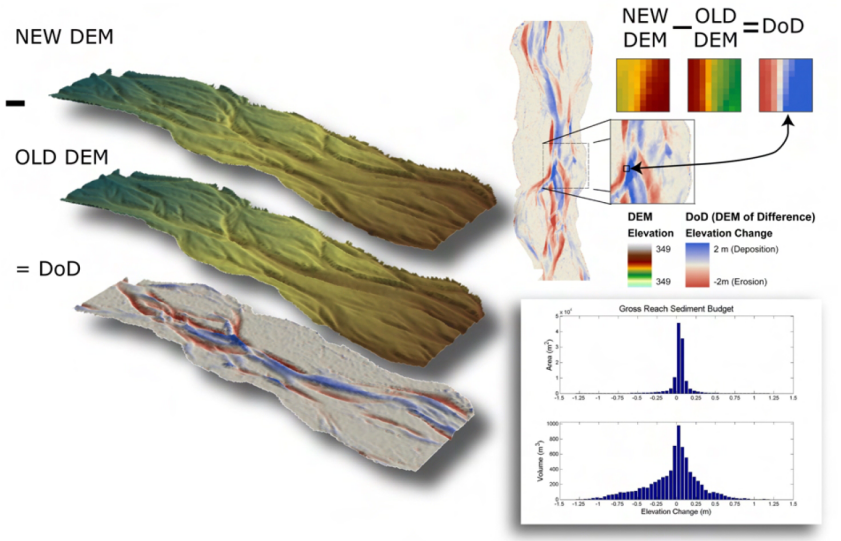



Figura 12 – Esquema do método de deteção de alterações *DoD.*
Fonte: WHEATON, 2008

No caso da **comparação de modelos 3D**, esta é executada através da avaliação da distância entre duas nuvens de pontos (**C2C**) (FIGURA 13) ou entre uma superfície/*mesh* e uma nuvem de pontos (**C2M**) (FIGURA 14), gerando um modelo que permite identificar as áreas de erosão e de deposição a partir de uma perspetiva tridimensional.

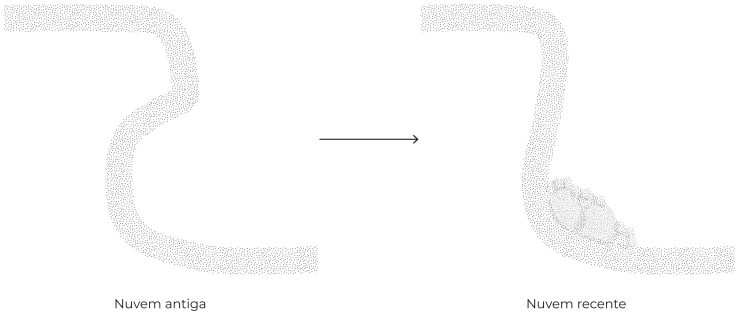



Figura 13 – *Cloud to Cloud* (C2C).

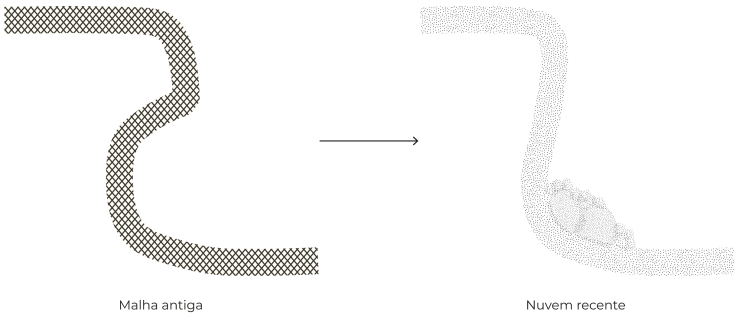



Figura 14 – *Cloud to Model* (C2M).

Um outro método relativo ao 3D que, segundo a bibliografia (GÓMEZ-GUTIÉRREZ & GONÇALVES, 2020; MATILDES, 2016; BARNHART & CROSBY, 2013), é apontado como o mais adequado relativamente ao tema deste trabalho, é o algoritmo **M3C2** (*Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison*) (LAGUE ET AL., 2013). Este estima a distância na direção normal local, considera erros e a rugosidade de forma a definir um intervalo de confiança para diferenciar a mudança real daquilo que é ruído, utilizando diretamente duas nuvens de pontos em vez de uma superfície com interpolações (GÓMEZ-GUTIÉRREZ & GONÇALVES, 2020).

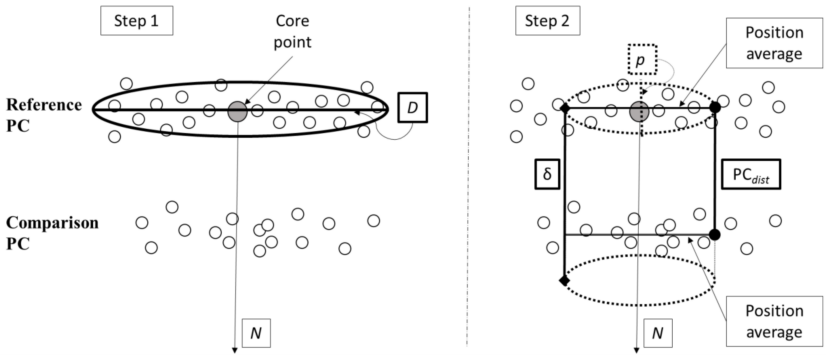



Figura 15 – Ilustração simplificada do algoritmo M3C2.
Fonte: CRAWFORD ET AL. (2018) *Adapted from* LAGUE ET AL. (2013)

Segundo CRAWFORD ET AL. (2018, P. 10) (FIGURA 15), "no *step 1*, a superfície normal (*N*) é determinada ao ajustar o plano aos pontos (círculos abertos) dentro de um diâmetro definido pelo utilizador, *D*, de cada *core point* (círculos cinzentos). No *step 2*, um cilindro com diâmetro *p* é centrado no *core point* e projetado ao longo da direção representada por *N*. O algoritmo projeta o cilindro acima e abaixo do *core point* mas, para simplificação, a figura mostra a projeção em numa direção única. O comprimento do cilindro é a distância máxima de procura (*δ*), e isso define um espaço onde os pontos correspondentes de ambas as nuvens são calculados e diferenciados para determinar a distância da nuvem de pontos ($PC_{dist}$). (…)".

## 1.2. Arribas, Processos e Movimentos de Vertente

As arribas são formas litorais caracterizadas por serem vertentes íngremes, talhadas em formações rochosas e que podem ter um declive superior a 40º (BIRD, 2008). Pela diversidade de fatores que distinguem as arribas, os agentes erosivos atuam de maneiras distintas, traduzindo-se em diferentes processos evolutivos que contribuem para determinar a forma, a curvatura e o declive das arribas, ou seja, o seu perfil. Esse perfil é constituído por quatro elementos geomorfológicos (FIGURA 16): o topo, a crista, a face, e a base ou sopé.




Figura 16 – Elementos geomorfológicos principais das arribas.

A morfologia e o comportamento das costas rochosas reflete a interação entre fatores geológicos (como o tipo de rocha e a estrutura) e os processos de erosão e alteração (MASSELINK ET AL., 2014), que atuam em diferentes escalas temporais e espaciais (VILES, 2001). As arribas são intensamente afetadas pela ação mecânica das ondas, pela meteorização, bioerosão, gelo e movimentos de massa em vertentes (TRENHAILE, 2019). Estes processos têm uma incidência espacial diferente (FIGURA 17) consoante inúmeros fatores, internos e externos às arribas, mas os seus efeitos naturais serão sempre condicionados pelas características geológicas da arriba.

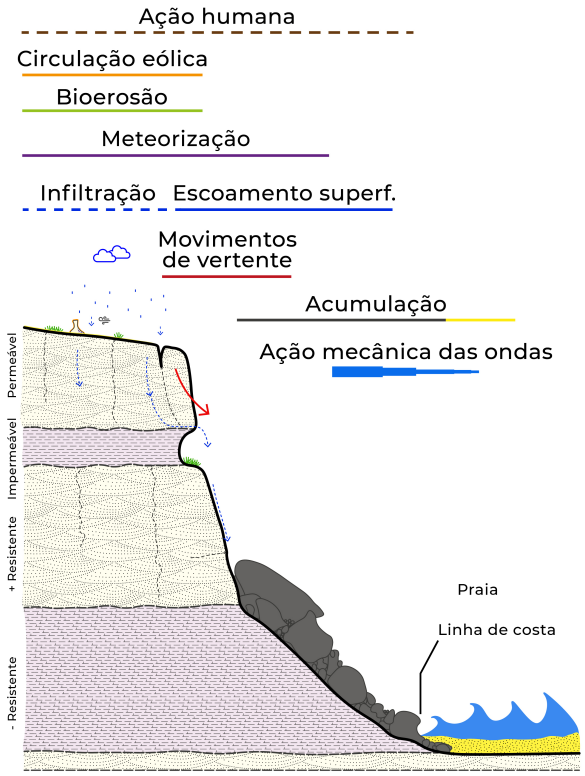



Figura 17 – Distribuição espacial de processos erosivos nas arribas.

MASSELINK ET AL. (2014) resume os principais processos erosivos que se verificam nas costas rochosas (TABELA 3):

**Tabela 3 – Principais processos erosivos que ocorrem na costa rochosa.**

| Processo | Descrição | Condições típicas que favorecem o processo |
|---|---|---|
| ***Ação mecânica das ondas*** | | |
| Erosão | Desagregação de material solto pela ação das ondas | Condições de forte ondulação e amplitude da maré microtidal |
| Abrasão | Raspagem de superfícies rochosas pelo fluxo das ondas, envolvendo água e sedimentos | Rochas de fraca resistência, condições de forte ondulação, fina camada de sedimentos e maré microtidal |
| Ação hidráulica | Variação de pressão induzida pelas ondas nas rochas, que causam e alargam fendas e promovem a capilaridade | Rochas de fraca resistência, condições de forte ondulação e amplitude de maré microtidal |
| ***Meteorização*** | | |
| Meteorização física | Geadas e ciclos de humedecimento/secagem que causam e aumentam a capilaridade e fendas das rochas (processos de crioclastia e termoclastia respetivamente) | Rochas sedimentares em regiões de clima frio |

| | | |
|---|---|---|
| Haloclastia | Crescimento do volume de cristais de sal em capilares e fendas, dilatando-as | Rochas sedimentares em regiões de clima quente e seco |
| Meteorização química | Processos químicos que degradam o material rochoso. Inclui processos como hidrólise, oxidação, hidratação e solução | Rochas sedimentares em regiões de clima quente e húmido |
| Nivelamento da camada de água | Ação conjunta da meteorização física, salina e química em poças de maré | Rochas sedimentares em áreas de evaporação elevada |
| ***Bioerosão*** | | |
| Bioquímica | Meteorização química por produtos de metabolismo | Rochas calcárias em regiões tropicais |
| Biofísica | Remoção física de rochas por pastoreio e organismos perfuradores, e expansão de fendas por raízes de plantas | Rochas calcárias em regiões tropicais |
| ***Movimentos de vertente*** | | |
| Quedas e tombamentos | Queda de rochas diretamente na face da arriba | Rochas fraturadas e erosão basal |
| Deslizamentos | Deslocação de material ao longo de uma superfície de rotura | Rocha intensamente desgastada e erosão basal |
| Fluxos | Escoamento de material solto ao longo da vertente | Material não consolidado e erosão basal |

Fonte: Adaptado de MASSELINK ET AL. (2014)

Um dos processos erosivos que mais contribui para elevadas taxas de recuo das arribas, são os movimentos de massa em vertentes (MATILDES, 2009). Estes acidentes geomorfológicos, ocorrem tanto no litoral como no interior e são agentes importantes na alteração da topografia e evolução natural da paisagem (KORUP, 2012). São eventos que resultam em danos e prejuízos avultados todos os anos, sendo um dos mais fatais e destruidores riscos naturais.

David Cruden definiu *landslide* (movimento de vertente) como um *movimento de descida, numa vertente, de uma massa de rocha, terra ou detritos* (CRUDEN, 1991, P. 28)[2]. Na bibliografia internacional podemos, também, encontrar termos como *mass wasting*, *mass movement*, *slope movement* ou *landslip*.

[2] Definição informal proposta no contexto do grupo de trabalho designado *Working Party on World Landslide Inventory* (*WP/WLI*), que reuniu esforços na tentativa de chegar a uma terminologia internacional. Este grupo de trabalho surgiu com a iniciativa da Organização das Nações Unidas (ONU) no âmbito da Década Internacional para a Redução de Desastres Naturais (*IDNDR*) (1990-2000).

A distinção entre tipologias, por vezes, divide a comunidade científica face à discussão em torno, sobretudo, das variáveis que desencadeiam, potenciam e constituem os movimentos, como por exemplo o tipo de mecanismo de movimento, o tipo de material, a velocidade e amplitude do movimento, ou a quantidade de água no terreno que é crítica na influência do tipo de movimento (Clague & Roberts, 2012).

O volume da massa em movimento pode variar entre menos de um metro cúbico a dezenas de quilómetros cúbicos; a sua velocidade pode ser extremamente lenta (milímetros por ano) ou extremamente rápida (>100 m/s) (TABELA 4); e o tipo de material pode envolver sedimentos não consolidados ou rochas litificadas (CLAGUE, 2013).

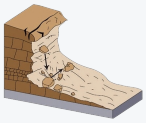
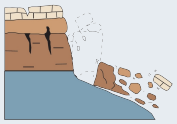
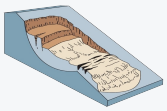
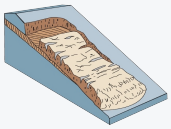
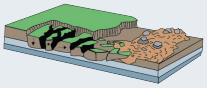
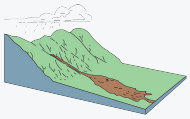
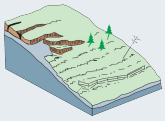
**Tabela 4 – Escalas de velocidade de movimentos de vertente e capacidade de resposta.**

| Classe de velocidade | Descrição | Velocidade (mm/s) | Velocidade típica | Resposta humana |
|---|---|---|---|---|
| **7** | Extremamente rápido | $5\times10^{3}$ | 5 m/s | Nenhuma |
| **6** | Muito rápido | | | Nenhuma |
| | | $5\times10^{1}$ | 3 m/min | |
| **5** | Rápido | | | Evacuação |
| | | $5\times10^{-1}$ | 1,8 m/h | |
| **4** | Moderado | | | Evacuação |
| | | $5\times10^{-3}$ | 13 m/mês | |
| **3** | Lento | | | Intervencionável |
| | | $5\times10^{-5}$ | 1,6 m/ano | |
| **2** | Muito lento | | | Intervencionável |
| | | $5\times10^{-7}$ | 16 mm/ano | |
| **1** | Extremamente lento | | | Nenhuma |

Fonte: Adaptado de CRUDEN & VARNES (1996) *in* PENACHO (2012)

Tanto em arribas como em taludes fora do contexto costeiro, os movimentos de vertente são alvo da mesma tipificação. Consideramos que as terminologias mais utilizadas e consensuais são propostas por VARNES (1978) e, com base nesse trabalho e em ZÊZERE (1997), apresentamos na TABELA 5 os tipos de movimentos de vertente:

**Tabela 5 – Classificação de movimentos de vertente.**

| TIPO DE MOVIMENTO | TIPO DE MATERIAL | | | DESCRIÇÃO |
|---|---|---|---|---|
| | Rocha | Grosseiro | Fino | |
| **Queda/desabamento (*fall*)**  | Queda de blocos | Queda de detritos | Queda de terras | Desprendimento de solo ou rocha que, por ação da gravidade, move descendentemente os materiais em forma de queda livre, saltação ou rolamento. |
| **Tombamento (*topple*)**  | Tombamento de blocos | Tombamento de detritos | Tombamento de terras | Rotação do material a partir de um ponto ou eixo situado abaixo do seu centro de gravidade. Geralmente desenvolve-se lentamente, terminando de forma muito rápida. |
| **Deslizamento (*slide*)** — **Rotacional**  | Deslizamento de material rochoso | Deslizamento de detritos | Deslizamento de terras | O material desloca-se ao longo da superfície de rotura, com uma geometria côncava, envolvendo uma rotação em que acontece um abatimento na parte montante e um levantamento no setor frontal do movimento. |
| **Translacional**  | | | | O material desloca-se ao longo de uma superfície relativamente plana, permanecendo em contacto com o solo ou rocha não afetado. |
| **Expansão lateral (*lateral spread*)**  | Em rocha | Em detritos | Em terras | Processo em que as massas coesivas de solo ou rocha se estendem, combinada com uma subsidência geral no material mais brando. Ocorre em declives pouco acentuados ou mesmo planos. |
| **Fluxo/Escoada (*flow*)**  | Fluxo de material rochoso | Fluxo de detritos | Fluxo de lama | Movimento espacialmente contínuo de uma massa que se assemelha a um fluído viscoso. Pode haver uma transição de deslizamento para fluxo consoante a quantidade de água envolvida, a mobilidade e a evolução do movimento. |
| ***Creep***  | *Deep creep* | *Creep* | | Fluxo de terra muito lento, impercetível e contínuo causado por tensão tangencial interna suficiente para causar deformação, mas insuficiente para causar roturas. |
| **Complexo (*complex*)** | Combinação de dois ou mais tipos de movimento principais | | | |

Fonte: Adaptado de VARNES (1978) e ZÊZERE (1997). Fonte das ilustrações: HIGHLAND & BOBROWSKY (2008)

A análise mais aprofundada a cada tipo de movimento pode ser consultada em obras como VARNES (1978), CRUDEN & VARNES (1996), HUNGR ET AL. (2013) e, numa versão mais acessível, em HIGHLAND & BOBROWSKY (2008).

A identificação do tipo de movimento de vertente pode ser uma tarefa difícil de concretizar. Nem sempre é possível admitir com toda a certeza quais são as causas e os

trajetos dos movimentos, ou mesmo reconhecer a existência de instabilidade iminente num talude.

> *Na maior parte dos casos, as causas (…) são múltiplas e verificam-se em simultâneo. (…) o fator final não é mais do que um mecanismo desencadeante (triggering factor) que coloca em movimento uma massa que já se encontrava no limiar de ruptura.*
>
> ZÊZERE (2005, P. 62)

Há três tipos de fatores que determinam a estabilidade das vertentes: de predisposição, preparatórios e desencadeantes (GLADE & CROZIER, 2005 E ZÊZERE, 2005 *IN* MENESES, 2011).

a) **Fatores de predisposição:** inerentes e estáticos ao terreno. Fatores geológicos (como a composição e a coesão dos materiais, descontinuidades, fissuração e permeabilidade); fatores morfológicos (como o declive e a curvatura); e ocupação da superfície topográfica (cobertura vegetal, infraestruturas, etc.).

b) **Fatores preparatórios:** dinâmicos e que promovem a instabilidade da vertente, mas sem desencadear o movimento. Por exemplo, episódios prolongados de precipitação de intensidade fraca, mas que pode levar à acumulação de uma grande quantidade água nas vertentes.

c) **Fatores desencadeantes:** são a causa instantânea do movimento. Integram processos naturais (precipitação, degelo, sismos, erosão basal) e antrópicos (escavações e construções).

As causas dos movimentos de vertente em arribas podem, ainda, ser associadas a grupos de causas externas e internas (COSTA, 2012):

a) **Causas externas:** ações (naturais e antrópicas) diretas sobre as arribas, como a erosão na base e no topo, o impacto das ondas - que difere consoante o seu tipo: ondas de águas profundas, de águas baixas e de transição (ARAÚJO, 2006) -, a variação rápida do nível da água do mar, a precipitação intensa e/ou prolongada, sobrecargas devido à impermeabilização (estacionamentos, acessos e construções), regas intensivas de espaços verdes, sismos e vento forte.

b) **Causas internas:** inerentes à própria arriba, como rotura progressiva (fissuração), meteorização, erosão por escoamento superficial e subterrâneo, alternância litológica, declive e altura dos taludes, raízes e vegetação.

De salientar que a energia das ondas, quando consequente de fortes tempestades, pode resultar em maiores perdas de terreno para o mar. Sob esta forma de erosão, as rochas mais suscetíveis são, sobretudo, sedimentares e metamórficas (CORNFORTH, 2005).

Neste contexto, apontamos CLAYTON & SHAMOON (1998) que quantifica a dureza e a resistência das rochas e que, segundo BIRD (2016), podemos categorizar em:

- **Muito resistentes:** quartzitos e arenitos, granito maciço e rochas metamórficas endurecidas.
- **Moderadamente resistentes:** ardósias, xistos, conglomerados e basaltos.
- **Pouco resistentes:** calcários (incluindo giz) e arenitos.
- **Muito pouco resistentes:** rochas de lama (rochas constituídas por pelo menos 90% de silte e argila) e areias não consolidadas.

Além da ação marinha nas vertentes costeiras e de outros processos erosivos (vento, humidade, amplitude térmica, meteorização, escoamento, bioerosão e processos antropogénicos) (BIRD, 2016), também o nível de porosidade e permeabilidade das rochas contribui para cenários de instabilidade, consoante o tipo de material rochoso, devido à capacidade de armazenamento de água e consequente saturação.

A **porosidade** corresponde à fração do espaço vazio na rocha, em que pode conter ar ou água. Define-se como a proporção entre o volume de espaços vazios e o volume total de uma rocha, expressa em percentagem (ŠPERL & TRČKOVÁ, 2008). Depende da forma e arranjo interno dos grãos, da calibração, compactação, cimentação, fraturação e dissolução do material rochoso. As formações rochosas não consolidadas têm uma porosidade superior às formações sedimentares bem consolidadas, e, por sua vez, as rochas cristalinas apresentam níveis de porosidade muito reduzidos (TEIXEIRA, 2011).

A **permeabilidade** é respeitante à capacidade de um material poroso permitir a passagem de um fluido (ŠPERL & TRČKOVÁ, 2008). Depende das características do material – como a porosidade, o tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas; e das

propriedades do fluido – como a viscosidade e o peso. Neste sentido, trata-se da resistência que uma rocha oferece à passagem da água, sendo, por exemplo, as areias muito permeáveis e as argilas pouco permeáveis (TEIXEIRA, 2011).

A **deriva litoral** é outro aspeto relevante que pode favorecer ou proteger a erosão costeira. A perda de areia nas praias pode tornar a base das arribas mais vulnerável à dinâmica das ondas, contribuindo para o aumento da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente (CORNFORTH, 2005). Em contrapartida, a existência de uma praia arenosa ou de blocos rochosos na base, pode contribuir para a proteção da base da arriba (BIRD, 2016). Importa realçar que o tamanho das rochas não é necessariamente sinónimo de proteção da base contra as ondas, na medida em que um bloco de grandes dimensões isolado pode ser mais movível do que um conjunto de blocos de menor dimensão, cuja capacidade de movimento é mais reduzida devido ao encaixe entre si (GÓMEZ-PAZO & PÉREZ-ALBERTI, 2021) (FIGURA 18).

Na hipótese da ação contínua do mar conjugada com a ausência de areia e de blocos na base da arriba, a erosão basal será facilitada, escavando a rocha em forma de sapa (FIGURA 19), levando a que a parte superior da arriba perca a base de sustentação e desmorone.




Figura 18 – Desaparecimento de bloco por ação do mar. Praia da Ponta da Vela.



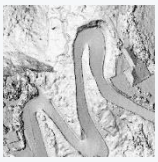
Figura 19 – Erosão basal. Formação de sapa na Praia Azul (21/05/21).

# Capítulo II – Materiais e metodologia

## 2.1. Materiais

Para a elaboração da cartografia temática já apresentada e para a obtenção dos resultados deste trabalho, foram-nos cedidos e obtidos os seguintes modelos digitais de elevação e superfície (TABELA 6):

**Tabela 6 – Modelos digitais utilizados.**

| Fonte | Ano | Resolução | Área aplicada | DEM (*hillshade*) |
|---|---|---|---|---|
| **CIGeoE**<br>**Câmara Municipal de Torres Vedras (CMTV)**<br>Altimetria | 2018 | 5 m/pix. | Todo o concelho |  |
| **Direção-Geral do Território (DGT)**<br>**Agência Portuguesa do Ambiente (APA)**<br>LiDAR | 2011 | 2 m/pix. | Faixa litoral de ca. de 250m |  |
| **Programa COSMO**<br>Aerofotogrametria | 2018 | 3 cm/pix. | Praia da Vigia<br>Porto da Assenta |  |
| **Autor**<br>Aerofotogrametria | 2020 - 2021 | 2,4 cm/pix. | Áreas de estudo |  |

O primeiro DEM, referente ao ano de 2018 e cedido pela Câmara Municipal de Torres Vedras, apresenta uma resolução espacial de 5 metros por pixel. É gerado através da triangulação (TIN – *Triangulated Irregular Network*) entre curvas de nível e pontos cotados. Foi utilizado no enquadramento da cartografia temática para a área do concelho.

O segundo, de 2011, fornecido pela DGT numa parceria com a APA, resulta de um levantamento aéreo LiDAR (*Light Detection And Ranging*) e tem resolução de 2 metros. Foi utilizado na elaboração da cartografia temática para a faixa litoral.

O terceiro (MDS), produzido no âmbito do Programa COSMO em 2018, apresenta uma grande resolução – 3 centímetros por pixel – que permite identificar pormenorizadamente as formas do relevo através de levantamentos aerofotogramétricos. Este programa de monitorização costeira abrange quatro áreas no concelho de Torres Vedras: Praia de Porto Novo – Praia de Santa Rita Norte; Praia da Vigia – Praia Formosa; Praia Azul; e Praia do Porto da Assenta. Neste trabalho foram utilizados dois destes modelos que correspondem às áreas de estudo da Praia da Vigia e do Porto de Pesca da Assenta.

Por fim, o último MDS exemplificativo, semelhante ao anterior, é resultado de um levantamento aéreo realizado numa área de estudo no âmbito deste relatório. Por cada levantamento aerofotogramétrico foi gerado um MDS, com resoluções que variam entre 1 e 5 centímetros por pixel, e um ortomosaico com resoluções de ca. de 2 cm/pix.

Foram também cedidos pela Câmara Municipal de Torres Vedras os dados em formato vetorial relativos à geologia, que reproduzem as Folhas 30-A e 30-C da Carta Geológica de Portugal (1:50 000), bem como outros elementos constituintes dos mapas.

Para a aquisição, processamento e interpretação dos dados produzidos e empregues no presente trabalho, foram utilizados os seguintes equipamentos e *softwares* (TABELA 7):

**Tabela 7 – Materiais utilizados.**

| | | | |
|---|---|---|---|
| ***Hardware*** | DJI Mavic Mini | UAS | Recolha de dados |
| | Emlid Reach RS2 | DGPS | |
| | Desktop 16GB, Intel® Core™ i7-8700K CPU @ 3.70GHz, GeForce GTX 1080 | Equipamento informático | Processamento, manipulação e interpretação de dados |
| ***Software*** | DJI Fly (*app* Android) | | Recolha de dados |
| | ReachView3 (*app* Android) | | |
| | Agisoft Metashape Professional 1.6.4 | | Processamento fotogramétrico |
| | CloudCompare v2.12 alpha | | Manipulação de dados |
| | Geomorphic Change Detection 7 | | |
| | QGIS 3.18.2 with GRASS 7.8.5 | | Cartografia; manipulação e interpretação de dados |
| | ArcMap 10.7.1 | | |
| | Adobe Illustrator 2020 24.3 | | Desenho e interpretação de resultados |

### 2.1.1. Aeronave não tripulada – *DJI Mavic Mini*

Segundo o manual de utilizador da aeronave não tripulada utilizada, o *DJI Mavic Mini* (FIGURA 20) é um quadricóptero/multirotor (4 motores) constituído, essencialmente, por um sistema de navegação por satélite (GNSS) (GPS + GLONASS), uma bússola magnética, um *gimbal* de 3 eixos (vertical [*yaw*], transversal [*pitch*] e longitudinal [*roll*]) que possibilita imagens estabilizadas, uma câmara e uma bateria inteligente, entre outros componentes de processamento fundamentais (DJI, 2019).



Figura 20 – *DJI Mavic Mini*.

É pilotado através de um controlo remoto, que integra tecnologia *Wi-Fi*, sendo conectado a um *smartphone* (ou *tablet*) através do *software DJI Fly*, que funciona como uma estação de controlo no solo (GCS), e que permite operar o *drone*, visualizar em tempo real a captação de imagens e os dados de voo.

Possui três modos de voo (de posição, desportivo e cinematográfico), que se diferenciam, sobretudo, na sensibilidade do controlo dos movimentos do manípulo e nas velocidades atingidas pela aeronave, sendo a velocidade máxima, em modo *sport*, de 13 m/s (46,8 km/h).

O tempo máximo de voo anunciado por bateria, com condições meteorológicas favoráveis, é de 30 minutos. Esse valor é muito dependente da velocidade da aeronave, do vento, da temperatura e da densidade do ar em pleno voo.

Este *drone*, de dimensões 245x290x55 mm, apresenta um peso de descolagem de 249g. Por isso, a resistência ao vento é muito reduzida, pelo que não é aconselhado voar com

ventos de velocidade superior a 8 m/s (28,8 km/h), nem em condições de neve, chuva e nevoeiro, ou com temperaturas inferiores a 0º C e superiores a 40º C.

A câmara fotográfica (modelo FC7203) tem um sensor CMOS 1/2,3", com resolução de 12 megapixéis (4000×2250) (captando em formato JPEG) e capaz de filmar em *Full HD* e 2.7K (em formato MP4). Tem uma lente de 24 mm (equivalente ao formato de 35 mm), com abertura *f*/2.8 e foco de 1 metro para o infinito, ISO de 100 a 3200 e a velocidade do obturador, em captação de fotografia, é de 4-1/8000s (manual) e 1-1/8000s (auto). O modo de fotografia dispõe da possibilidade de captar com disparo único ou com intervalo de 2/3/5/7/10/15/20/30/60 segundos.

Podemos considerar que se trata de um *drone* de consumo "*ultra low-cost*" comparativamente a outros modelos. Em termos de qualidade-preço, apresenta-se vantajoso dada a sua autonomia dentro da média, qualidade de imagem e portabilidade (DJI, 2019). No entanto, a sua fraca robustez pode ser limitadora por não suportar os ventos persistentes sentidos no litoral. Também a incapacidade de fazer voos planeados pode ser uma condicionante em determinadas situações, pois permitiria fazer voos em trajetos pré-definidos, com posições e ângulos iguais ao longo do período de monitorização.

### 2.1.2. DGPS Emlid Reach RS2

A necessidade de obter resultados rigorosos implica a utilização de *Ground Control Points* (GCPs). Para o levantamento das coordenadas associadas a esses *pontos de controlo*, em cada área de estudo, foi utilizado o DGPS *Emlid Reach RS2* (FIGURA 21).




Figura 21 – DGPS *Emlid Reach RS2*.

Este equipamento apresenta uma série de características que torna a sua atuação no campo bastante eficiente, tais como (EMLID, 2021): a operação centimétrica em posicionamento estático, RTK (até 60 km) e PPK (até 100 km); a rapidez da receção dos dados (~5 segundos); conexão com aplicação móvel própria (*ReachView3*); conectividade *LoRa* (*Long Range*) *radio, Wi-Fi* e *Bluetooth*; sistema de navegação por satélite GPS, GLONASS, BeiDou e Galileo, *multi-band* L1 e L2; correções a partir de estação de referência que pode ser através de um segundo *Reach RS2* ou a partir de uma ligação NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*); robustez e portabilidade; e autonomia de 22 horas ou de 16 horas enquanto *rover* a operar em 3G.

### 2.1.3. Agisoft Metashape Professional 1.6.4

O *Agisoft Metashape* é um *software* comercial de processamento fotogramétrico de imagens digitais, com capacidade de gerar dados espaciais 3D a fim de serem utilizados em aplicações SIG, na documentação de património cultural, executar medições indiretas de objetos de várias escalas, entre outras aplicabilidades (AGISOFT LLC, 2021).

Este programa (FIGURA 22) segue um fluxo de trabalho (*workflow*) automatizado, solicitando ao utilizador apenas a definição de alguns parâmetros e a marcação de GCPs nas fotografias. Baseia-se na aplicação de algoritmos de *Structure-from-Motion* e de *Multi-View Stereo*, resultando nos produtos já demonstrados na FIGURA 5.

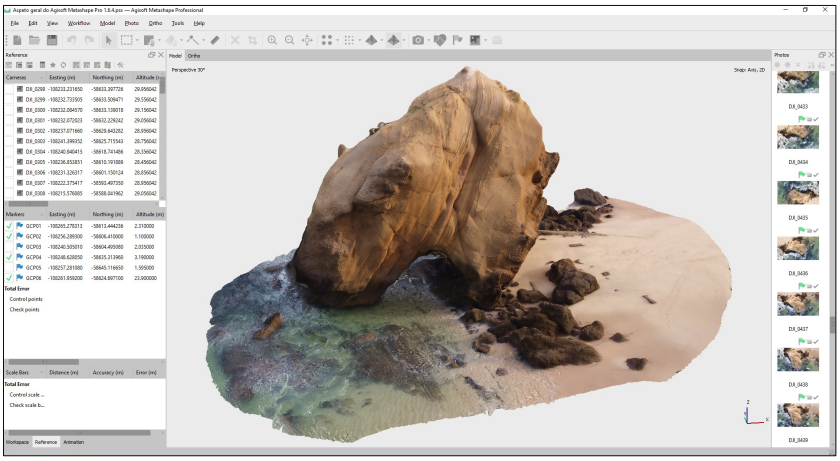


Figura 22 – Aspeto geral do *Agisoft Metashape Pro 1.6.4*.

### 2.1.4. CloudCompare v2.12 alpha

O *CloudCompare* (FIGURA 23) é um *software open source* desenvolvido no âmbito de um trabalho de doutoramento e que evoluiu com o contributo de diversos investigadores, cuja principal finalidade é a deteção de alterações em objetos geométricos tridimensionais, utilizando nuvens de pontos densas (MATILDES, 2016).

Como já referido (VER 1.1.2), o programa possibilita três operações de comparação de dados: entre duas nuvens de pontos (**C2C**), entre uma nuvem de pontos e uma *mesh* (**C2M**) e uma comparação entre duas nuvens de pontos com maior rigor (**M3C2**; LAGUE ET AL., 2013). A distinção detalhada entre esses algoritmos pode ser consultada no trabalho de MATILDES (2016).

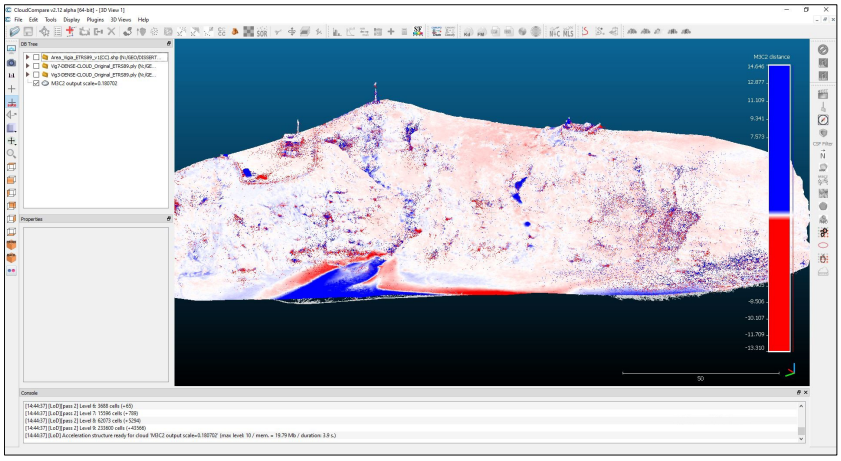


Figura 23 – Aspeto geral do *CloudCompare v2.12 alpha*.

### 2.1.5. Geomorphic Change Detection 7

Para o cálculo da diferença entre DEMs (*DoD*) foi utilizado o *software* *Geomorphic Change Detection 7*, na sua versão *AddIn* para *ArcMap* (*10.7.1*), estando também disponível enquanto *standalone* não necessitando assim de qualquer licença (FIGURA 24).

O desenvolvimento deste programa direciona-se, principalmente, à deteção de alterações topográficas em canais fluviais. No entanto, é possível calcular mudanças de volume em qualquer superfície com base em dois DEMs (formato matricial) derivados de levantamentos topográficos distintos.

Os métodos de deteção possíveis consistem na definição de um valor mínimo de deteção ($_{min}$LoD), propagação de erros e definição de um intervalo de confiança. A

informação metodológica detalhada pode ser consultada em WHEATON (2008) e WHEATON ET AL. (2009).

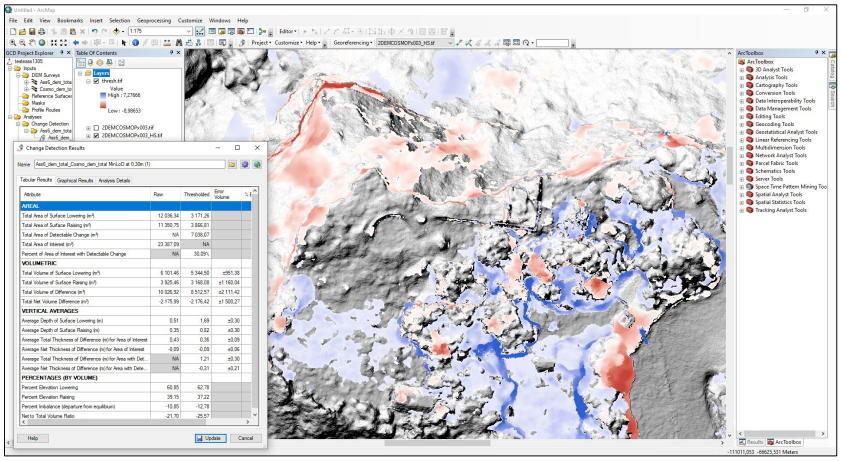


Figura 24 – Aspeto geral do do a*ddIn GCD* no *ArcMap 10.7.1*.

## 2.2. Procedimento metodológico

A metodologia seguida no presente trabalho compreendeu três etapas: a aquisição de dados, o seu processamento e consequentes resultados primários, e a obtenção de resultados para análise (FIGURA 25):

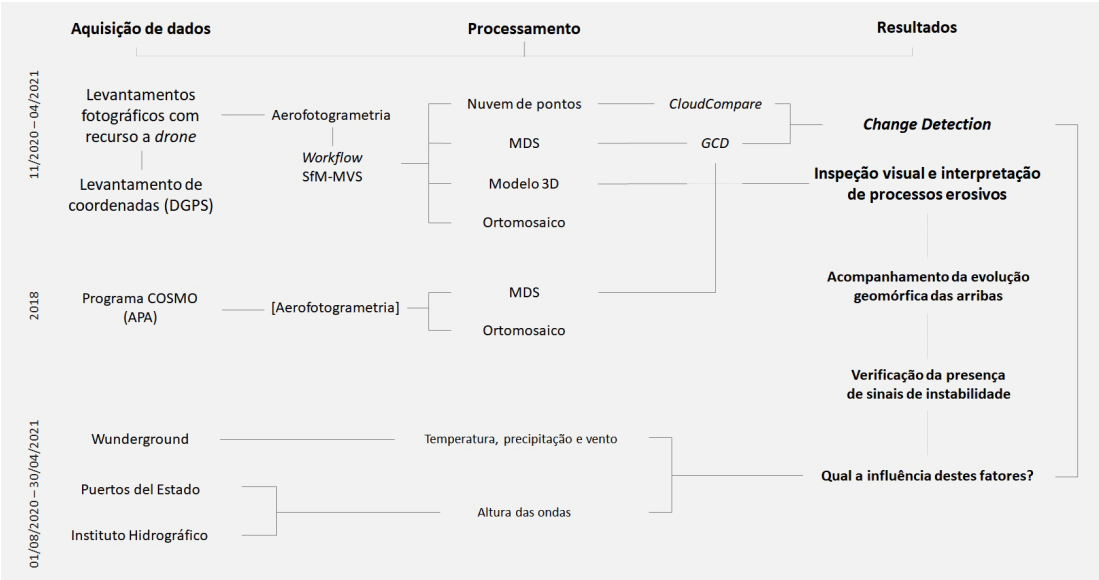



Figura 25 – Metodologia.

Em primeiro lugar, foram identificados 7 setores de arriba que se consideraram relevantes para este estudo. Situadas no litoral de Torres Vedras, as áreas de estudo dividem-se em dois grupos: *áreas-exemplo* e *áreas de monitorização*.

As ***áreas-exemplo*** são relativas a 4 sítios com os quais se pretende demonstrar a ocorrência de algum tipo de processo através de fotointerpretação. As ***áreas de monitorização*** correspondem a 3 setores onde se executou integralmente a metodologia aqui apresentada, sob a forma de um plano de monitorização frequente com o intuito de acompanhar a evolução das arribas e determinar a viabilidade deste procedimento metodológico.

A TABELA 8 indica, de norte para sul, as áreas de estudo e respetiva superfície sobrevoada, a sua integração no Programa COSMO e o período de monitorização ou datas de voo, consoante o tipo de área.

**Tabela 8 – Áreas de estudo: áreas-exemplo e áreas de monitorização.**

| Área de estudo | Tipo de área | Área total aprox. (ha) | | COSMO | Período de monitorização / Data de voos |
|---|---|---|---|---|---|
| **Praia das Conchas** | Área-exemplo | 13 |  | – | 08/04/21 |
| **Praia da Mexilhoeira** | Área de monitorização | 1 |  | – | 24/10/20 – 18/04/21 |
| **Cascata na Praia da Mexilhoeira** | Área-exemplo | 1,5 |  | – | 01/11/20 – 18/04/21 |
| **Praia da Vigia** | Área de monitorização | 4 |  |  | 17/12/20 – 18/04/21 |
| **Miradouro da Formosa** | Área-exemplo | 2 |  |  | 14/04/21 |
| **Porto de Pesca da Assenta** | Área de monitorização | 10 |  |  | 21/02/21 – 29/04/21 |
| **Acesso a Porto Barril** | Área-exemplo | 5 |  | – | 03/05/21 |

Para as áreas acompanhadas ao longo de várias semanas, o plano de monitorização – que se previa mais sistemático – sofreu algumas limitações, quer em virtude da situação pandémica da COVID-19, à data da elaboração deste trabalho, quer devido a condições meteorológicas que, por vezes, se verificaram pouco favoráveis à utilização do *drone*.

Após a obtenção das fotografias, o processamento consistiu, numa primeira fase, na restituição tridimensional das arribas em estudo, através da técnica SfM-MVS, utilizando o software *Agisoft Metashape Pro*, onde são obtidos os resultados primários, ou seja, nuvens de pontos, modelos digitais de superfície e ortomosaicos.

Esses resultados possibilitam, desde logo, manipular tridimensionalmente os modelos, calcular volumes e distâncias ou fazer uma análise interpretativa de processos nas arribas. Posteriormente, são exportadas as *dense clouds*, *meshes* e os modelos digitais para realizar comparações e detetar se ocorreram alterações entre um intervalo temporal. Para este processo de comparação foram utilizados os *softwares* *CloudCompare* e *Geomorphic Change Detection* (este através do *ArcMap*), para a deteção de alterações 3D e 2.5D respetivamente.

De forma a verificar se eventuais alterações detetadas poderão estar relacionadas com cenários tempestuosos, foram, também, recolhidos os dados meteorológicos e de ondulação para o período compreendido entre 1 de agosto de 2020 e 30 de abril de 2021.

Os dados relativos à temperatura, precipitação e vento foram registados por uma estação meteorológica amadora localizada em Santa Cruz, disponível no *Wunderground* (estação *IADOSCUN2* e correções pontuais com dados da estação *ISILVE2*, localizada na Silveira).

Os dados utilizados referentes à altura das ondas foram obtidos no portal *Puertos del Estado* (que se baseia num modelo numérico – *ponto SIMAR 1042056* – localizado ao largo do litoral de Mafra) e os dados reais de ondulação solicitados ao *Instituto Hidrográfico*, relativos à boia *Nazaré costeira*.

### 2.2.1. Aquisição de dados

O processo de aquisição de dados culminou, no total, em 31 levantamentos aerofotográficos com recurso a *drone* (22 em *áreas de monitorização* e 9 em *áreas-exemplo*, TABELA 8), e num levantamento topográfico, com recurso a DGPS, para cada uma das *áreas de monitorização*, totalizando 3 *surveys*.

#### 2.2.1.1. Fotografia aérea

Como referido, foi utilizado o *drone DJI Mavic Mini* para a obtenção das fotografias aéreas. Atendendo a condicionante relativa à automatização dos voos com parâmetros pré-definidos que, em parte, pode ser considerada uma limitação no âmbito da fotogrametria aérea, podemos afirmar que a realização de voos de forma manual poderá não ter sido totalmente inconveniente neste caso específico, pois tornou os levantamentos, em certa medida, mais flexíveis e adequados às condições verificadas no terreno no exato momento, como a luz solar direta no sensor em fotografias oblíquas, o vento que compromete a velocidade e a bateria, o nevoeiro que levou à necessidade de aproximação do *drone* das superfícies, ou a presença de aves marinhas que nos forçaram a interromper dois voos. No entanto, além das condições de luminosidade, o não planeamento dos voos é um fator que poderá contribuir para eventuais divergências entre os modelos.

Em cada voo realizado, executado manualmente, as fotografias foram captadas a diferentes alturas dos planos (geralmente 35, 55 e 90 metros), a uma velocidade entre 0,5 e 2,5 m/s, com um intervalo de 2 segundos para garantir que eram recolhidas um número suficiente de fotografias úteis para gerar uma boa sobreposição (*overlap*).

Os levantamentos nas três *áreas de monitorização* resultaram num número total de fotografias superior a 8 500. Destas, devido a condições de exposição, velocidade e vento – que provoca instabilidade e consequente desfoque das fotografias –, foi feita uma devida seleção das mesmas e removidas 1 836 imagens.

Porém, sobretudo nos primeiros voos em cada caso de estudo, verificámos uma cobertura de área e sobreposição débil que teria sido ultrapassada se nesses casos

tivéssemos captado maior número de fotografias, principalmente a partir de várias perspetivas, que levaria a maior número de pontos correspondentes.

Os dados relativos aos levantamentos aéreos encontram-se discriminados em anexo (TABELA 13)**.**

#### 2.2.1.2. *Groud Control Points* (GCP) aplicados nas áreas de estudo

Para o levantamento das coordenadas geográficas (*x*, *y* e *z*) o mais exatas possível, foi utilizado um GPS diferencial, como já mencionado. No entanto, esta etapa não foi executada quando seria desejável devido à falta de acesso imediato ao mesmo. Como alternativa, numa primeira fase de testes, a extração das coordenadas passou pela identificação de pontos comuns entre os levantamentos efetuados e os modelos do Programa COSMO (georreferenciados) – para a área da Praia da Vigia e do Porto de Pesca da Assenta -, e de imagens de satélite do *Google Earth Pro* para a Praia da Mexilhoeira. Naturalmente, devido à resolução e precisão distintas de ambas as "ferramentas", foram obtidos melhores resultados experimentais ao utilizar a primeira.

Pela impraticabilidade que seria distribuir plataformas ao longo das áreas de estudo durante o período de monitorização, a opção tomada consistiu maioritariamente na identificação de pequenos tufos de vegetação ou de marcas características em rochas que, apesar de não ser o ideal, permitem-se na sua maioria identificar nos levantamentos realizados ao longo do período de monitorização.

Com a condicionante relativa ao DGPS já ultrapassada, utilizando o *Emlid Reach RS2*, foi executado o levantamento das coordenadas dos GCPs.

Através da tecnologia NTRIP e operando em RTK, foi tida como referência a Estação GPS/GNSS de Arruda dos Vinhos (*ARRD*) (TABELA 9), da Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS (ReNEP), situada a cerca de 30 quilómetros das áreas em estudo. Posteriormente foram feitas as correções da altitude, subtraindo aos valores obtidos com o DGPS a diferença entre a altitude elipsoidal à altitude ortométrica da estação de referência.

**Tabela 9 – Dados da Estação de Referência utilizada.**

| Estação de referência de Arruda dos Vinhos (ARRD) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Latitude** | **Longitude** | **M** | **P** | **Altitude elipsoidal** | **Altitude ortométrica** |
| 38º 58'58.40827"N | 9º04'45.99055"W | -81997.992 m | -75664.610 m | 176.556 m | 122.540 m |

Fonte: ReNEP

No total, para as três áreas de monitorização, entre *Ground Control Points* e *Check Points*[3], foram recolhidas 46 coordenadas no sistema de referência ETRS89/Portugal TM06 (EPSG:3763) (FIGURA 26).

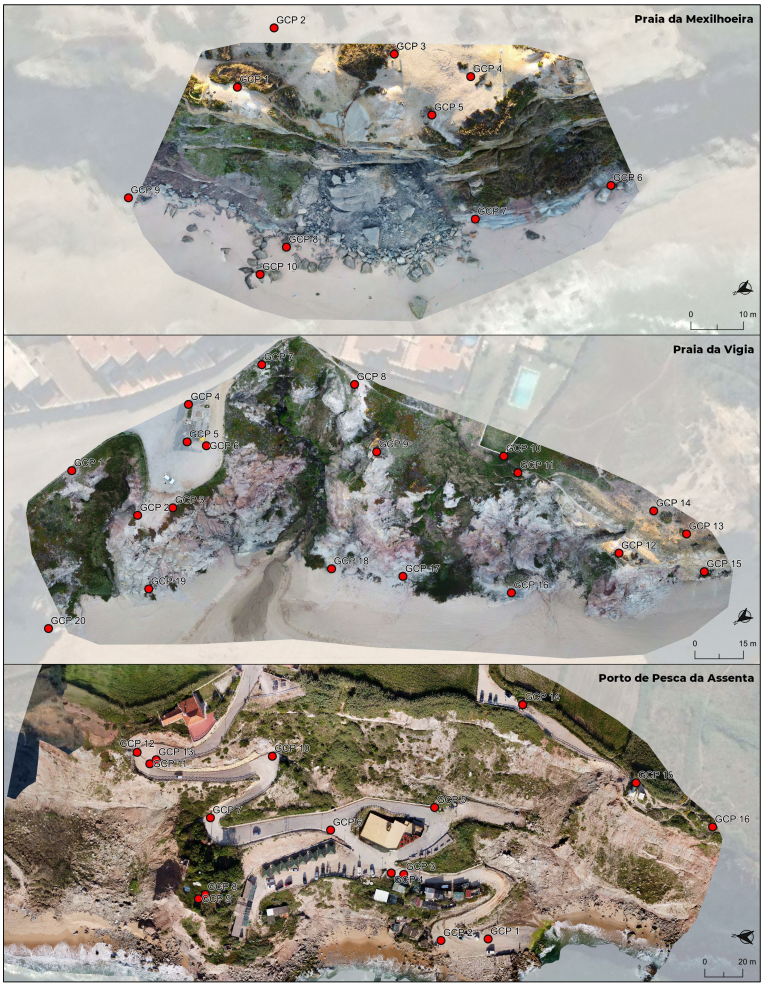



Figura 26 – Localização dos GCPs nas três áreas de monitorização.

Este *survey* foi realizado ao longo do dia 26 de abril de 2021 e os dados das coordenadas recolhidas podem ser consultados em anexo (TABELA 14, TABELA 15 e TABELA 16).

[3] Ponto de controlo que não é utilizado diretamente no processo de modelação fotogramétrica, mas está disponível para verificar a precisão do modelo gerado.

### 2.2.2. Processamento de dados

Após a aquisição das imagens com recurso a UAS, o processamento dos dados dividiu-se, numa primeira fase, no *workflow* relativo à técnica SfM-MVS e, posteriormente, à fotointerpretação e à deteção de alterações utilizando os modelos produzidos, em formato bi e tridimensional.

A fotointerpretação recorreu aos modelos 3D gerados, a consulta de bibliografia e das cartas geológicas, de fotografias do SIARL (Sistema de Administração do Recurso Litoral) e, posteriormente, à representação gráfica através do *software Adobe Illustrator 2020*.

#### 2.2.2.1. *Structure-from-Motion with Multi-View Stereo*

Através do *workflow* do processamento SfM-MVS (FIGURA 27), utilizando o *Agisoft Metashape Pro 1.6.4* (do qual se recomenda a leitura do manual do utilizador, AGISOFT, 2020), foi criado um projeto para cada levantamento e importadas as fotografias respetivas a cada voo.

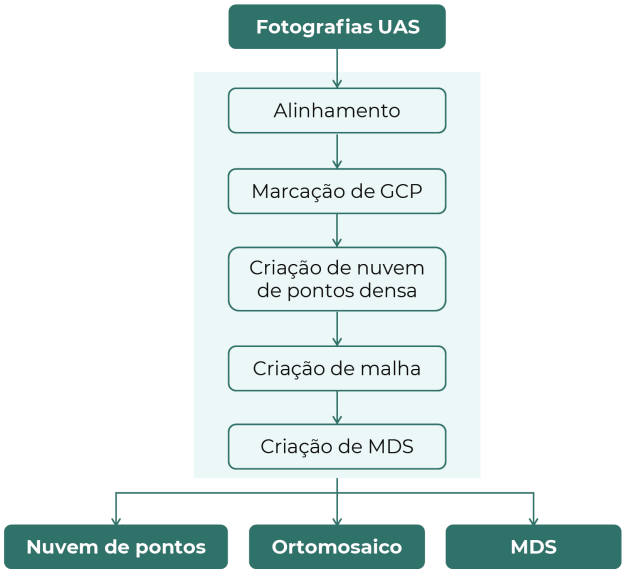



Figura 27 – *Workflow* geral do processamento SfM-MVS.
Fonte: Adaptado de VILLANUEVA & BLANCO (2019)

Antes da primeira etapa foi utilizado o comando que estima a qualidade das imagens (*estimate image quality*), de forma a remover facilmente as fotografias que o programa identifica como possível influência negativa nos resultados, como imagens desfocadas. Neste trabalho, foram removidas as imagens cujo valor apresentado era inferior a 0.7.

Deverá, ainda, ser confirmado o sistema de coordenadas que está a ser utilizado e, se necessário, fazer a sua conversão de forma a trabalhar com as fotografias e GCPs no mesmo sistema.

O primeiro passo do processamento de SfM consiste em fazer o alinhamento das fotos (*workflow* > *align photos*). É um processo automático em que o programa estima a posição das fotografias através de parâmetros de orientação interior (distância focal, coordenadas do ponto principal da imagem e distorção da lente) e orientação exterior (que define a orientação e posição da câmara, como os seus movimentos de translação e ângulos de rotação). O resultado deste processamento fotogramétrico é uma **nuvem de pontos esparsa** (*sparse point cloud*) que contém as posições trianguladas dos pontos correspondentes (*tie points*) do conjunto de imagens.

Após alguns testes, concluímos que um elevado número de fotografias não significa necessariamente bons resultados, mas condiciona severamente o tempo de processamento, sendo por vezes desnecessário por nada acrescentar aos modelos. Por essa razão foi utilizado, em alguns casos, o comando "*Reduce overlap*", que permite limitar em número as fotografias a utilizar. Segundo o manual, são analisadas e determinadas um conjunto de imagens que são úteis e outras que, por serem redundantes, podem ser desativadas ou removidas (AGISOFT, 2020). Para ser possível utilizar esta função, após o alinhamento é gerada uma *mesh* tendo como base a nuvem de pontos esparsa e, assim, indicar o número de fotografias que se pretende utilizar.

De seguida, é importado um documento *.txt* (ou *.xml* ou *.csv*, por exemplo) que contém as coordenadas obtidas através dos levantamentos topográficos. Estas coordenadas são relativas aos ***ground control points***, que são marcados nos respetivos sítios em cada fotografia onde são bem visíveis. Será a etapa que requer mais interação por parte do utilizador. Para isso, após gerar uma *mesh* com base na *sparse point cloud*, é marcado cada ponto de controlo em algumas fotografias até o *software* reconhecer a localização aproximada do mesmo nas restantes imagens (aconselha-se o uso de filtro por marcador, de forma a facilitar o processo de marcação). Quando reconhecer (exibindo uma bandeira azul), estes devem ser validados pelo utilizador (exibindo uma bandeira

verde). Concluída a marcação, é realizada a otimização do alinhamento das imagens (*Optimize Cameras*) ou, se necessário, refeito o alinhamento.

Após a marcação dos GCPs, segue-se o processamento MVS, que consiste em gerar uma **nuvem de pontos densa** (*dense point cloud*). Considerando os parâmetros de orientação interna e externa, o programa calcula mapas de profundidade (*depth maps*) através dos pares de fotografias sobrepostas, sendo esta a base para gerar a nuvem de pontos densa. Cada ponto tem a si associado uma coordenada (*x*, *y* e *z*) e uma cor (RGB). Esta será a etapa de processamento mais demorada, sobretudo se a qualidade pretendida for elevada (*high*). Finalizado esse processo, quando necessário, é feita a limpeza manual dos pontos desenquadrados (*outliers*) ou desnecessários, como das áreas de areia ou mar.

Através da *dense point cloud*, é possível reconstituir a superfície da cena ou objeto numa **malha poligonal e tridimensional** (*mesh*), esta mais completa do que a originada pela *sparse cloud* ou pelos *depth maps*. Ao modelo gerado, é ainda possível adicionar uma textura com base nas fotografias, tornando a superfície mais realista.

Há, ainda, a possibilidade de gerar um *tiled model* que permite visualizar os modelos 3D em alta resolução. Estes modelos podem ser construídos a partir da *dense point cloud* (a melhor opção), *sparse point cloud* ou *depth maps*, e, à semelhança da *mesh*, são texturizados através das fotografias de origem.

A próxima etapa é a construção de um **modelo digital de superfície (MDS)**, podendo ser gerado através de uma *dense point cloud*, *sparse point cloud*, *depth maps* ou *mesh*, sendo o resultado de maior precisão através da primeira. Este permite, e inclusivamente no próprio programa, realizar medições de distâncias, áreas e volumes.

Por fim, é gerado um **ortomosaico** através das imagens aéreas, obtido pela ortorretificação das imagens originais.

À exceção da nuvem de pontos esparsa originada pelo alinhamento, os restantes resultados obtidos podem ser exportados e trabalhados noutros programas. Neste trabalho, foram exportadas as nuvens de pontos densas, malhas e MDS para realizar comparações, e ortomosaicos para visualização e elaboração de mapas.

#### 2.2.2.2. *Change Detection*

Através dos resultados obtidos no ponto anterior é possível realizar operações de comparação entre modelos digitais e entre nuvens de pontos, para a mesma área entre dois períodos diferentes.

Na **comparação entre DEMs** – *DoD* – através do *Geomorphic Change Detection*, são inseridos dois modelos de diferentes épocas, sendo o modelo mais recente subtraído ao mais antigo.

A abordagem utilizada (FIGURA 28) foi a definição de um valor mínimo de deteção ($_{min}$**LoD**) de 0,30 m para todas as áreas e levantamentos analisados. Esse valor foi ponderado tendo em consideração que quanto maior o limite mínimo de deteção, maior é a informação perdida mas, também, maior é o grau de confiança nas alterações verificadas (WHEATON ET AL., 2009).

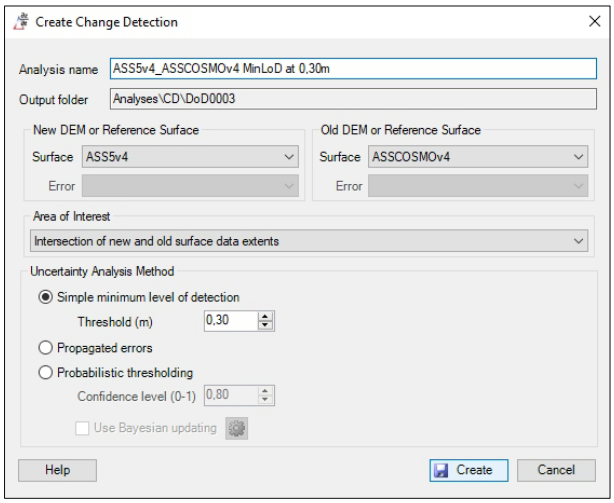



Figura 28 – Parâmetros para *DoD* no *Geomorphic Change Detection*.

De forma a limitar as deteções ocorridas apenas às próprias arribas, foram delineadas e desconsideradas as áreas onde ocorrem ações antrópicas, como a circulação de automóveis ou a alteração na disposição de ecopontos e construções.

Ainda assim, no decorrer desta etapa, verificou-se a presença de erros induzidos pelo desvio (*offset*) entre MDS. Estes desvios, sobretudo nas áreas de declive acentuado, resultam em grandes erros verticais na medida em que um único *pixel* é o suficiente para condicionar severamente o valor máximo real de erosão ou de deposição. Este erro

deve-se à geometria distinta entre os modelos que, embora ligeira, presumivelmente, resultam das diferentes rotas dos voos ou das condições de luminosidade.

Por essa razão, onde se verificaram diferenças irreais na crista, os modelos foram cortados de forma a descartar esses erros, permitindo assim identificar as alterações factualmente mais próximas da realidade.

No total, são apresentadas 13 comparações entre MDS para as três áreas de monitorização (TABELA 10).

**Tabela 10 – Comparação entre os MDS, por áreas de monitorização.**

| Mexilhoeira | Vigia | Porto de Pesca da Assenta |
|---|---|---|
| 1 nov. 20 – 27 dez. 20 | 17 dez. 20 – 13 fev. 21 | 21 mar. 21 – 18 abr. 21 |
| 27 dez. 20 – 13 fev. 21 | 13 fev. 21 – 22 abr. 21 | 18 abr. 21 – 29 abr. 21 |
| 13 fev. 21 – 22 fev. 21 | 17 dez. 20 – 18 abr. 21 | 05 mai. 18* – 18 abr. 21 |
| 20 mar. 21 – 02 abr. 21 | 23 jul. 18* – 18 abr. 21 | – |
| 02 abr. 21 – 18 abr. 21 | – | – |
| 1 nov. 20 – 18 abr. 21 | – | – |

***** Comparação com os MDS do Programa COSMO, relativos a 2018.

Assim como a técnica de comparação anterior, a **deteção de alterações em modelos tridimensionais** segue a mesma lógica da subtração do produto mais recente ao mais antigo. Mas, neste caso, os métodos de comparação baseiam-se algoritmos que avaliam a distância entre duas nuvens de pontos (C2C e M3C2) ou entre uma nuvem de pontos e uma superfície (C2M).

Neste trabalho, os métodos explorados foram o C2M e o M3C2, sendo que o primeiro revelou-se de menor eficiência quanto à representação de quedas de blocos, pela qual optámos por apresentar apenas um exemplo para comparação.

Como neste ponto o resultado pretendido se cinge à representação e identificação de movimentos de vertente – de certa forma descurando a sua precisão –, para gerar a diferença a partir do método M3C2, após adicionar as nuvens de pontos recortadas pela área desejada, os valores foram definidos automaticamente pelo programa através do botão "*Guess params*" seguida da seleção do modo de cálculo *"Multi-scale*". Com a

diferença projetada numa nova nuvem de pontos é feita a sua representação, tendo, neste caso, sido definida uma escala de representação com valores entre -0,5 e 0,5.

As comparações entre modelos tridimensionais foram as seguintes (TABELA 11):

**Tabela 11 – Comparação tridimensional, por áreas de monitorização.**

| Mexilhoeira | Vigia | Porto de Pesca da Assenta |
|---|---|---|
| 1 nov. 20 – 18 abr. 21 * | 17 dez. 20 – 18 abr. 21 | 21 mar. 21 – 29 abr. 21 |

***** Comparação através de método C2M e M3C2.

# Capítulo III – Resultados

## 3.1. Litoral do Concelho de Torres Vedras

O concelho de Torres Vedras (FIGURA 29) localiza-se a noroeste de Lisboa e integra a NUT II Centro e NUT III Oeste. Subdivide-se em 13 freguesias, ao longo de 407,15 km$^2$ de área, contando com 79 465 habitantes (195,2 hab./km$^2$), segundo os CENSOS 2011.

O setor costeiro deste município é limitado pelos concelhos da Lourinhã e Mafra, e dividido pelas freguesias de A-dos-Cunhados e Maceira, Silveira, e São Pedro da Cadeira, respetivamente de norte para sul. Esta área é abrangida pelo Programa da Orla Costeira Alcobaça-Cabo Espichel (POC-ACE).

De forma geral, o concelho não apresenta um relevo muito acidentado. A altimetria varia entre os 0 metros e a cota máxima de 395 m a sudeste, na Serra do Socorro, destacando-se ainda, a este, a Serra Alta (360 m).

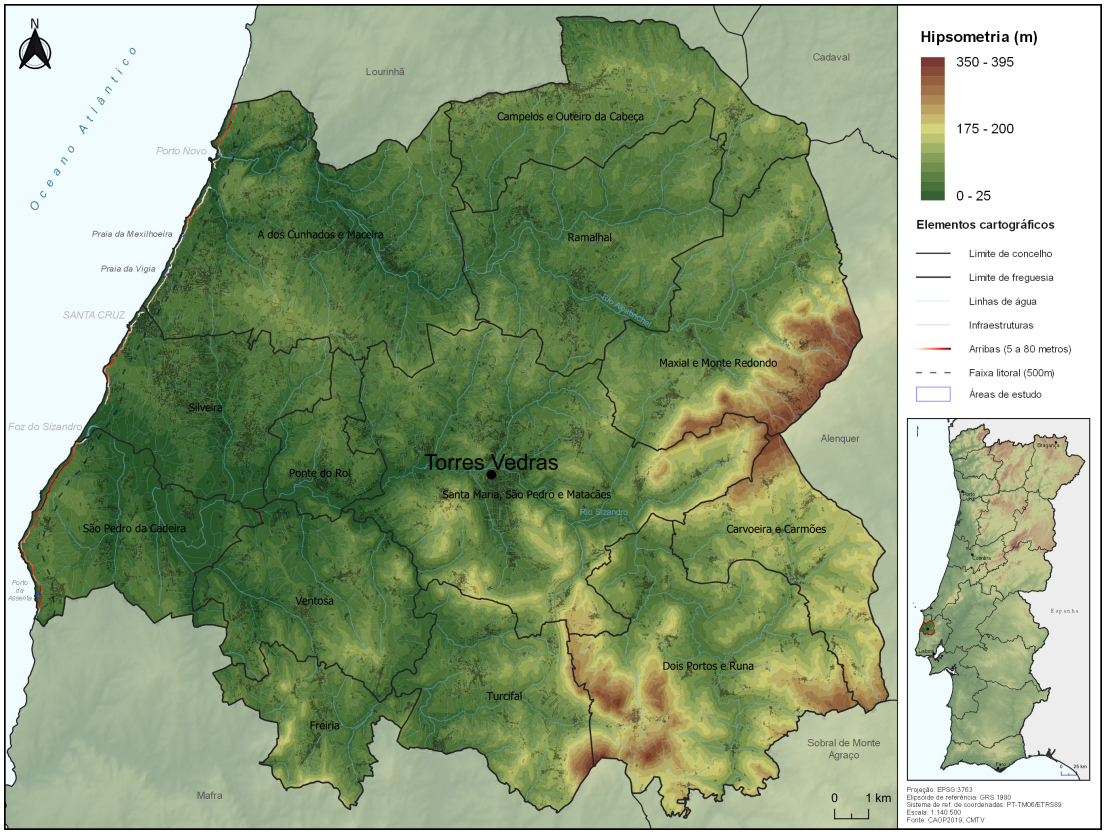


Figura 29 – Enquadramento do concelho de Torres Vedras.

O litoral de Torres Vedras conta com aproximadamente 18,7 km de extensão, sendo que cerca de 16,9 km (90,3%) constituem um sistema de arriba e de praia-arriba. As restantes áreas são relativas, essencialmente, aos sistemas dunares de Santa Rita e Praia Azul/Foz do Sizandro, e às fozes dos principais rios – Alcabrichel e Sizandro.

### 3.1.1. Condições fisiográficas do litoral de Torres Vedras

A **altitude das cristas** das arribas (FIGURA 30 E FIGURA 31A) oscila entre os 5 e os 81 metros. As mais altas encontram-se a entre a Ponta da Vela e a Praia de Porto Chão (81 m); no vértice geodésico do Alto da Vela em Santa Cruz (75 m); e na Praia das Conchas (a norte de Porto Novo, 73 m). As arribas de menor altura correspondem a uma área junto à Praia do Porto Barril – Mafra (na extremidade sul do concelho, com 5 m); junto às dunas de Santa Rita (8 m); e à Foz do Sizandro (9 m).

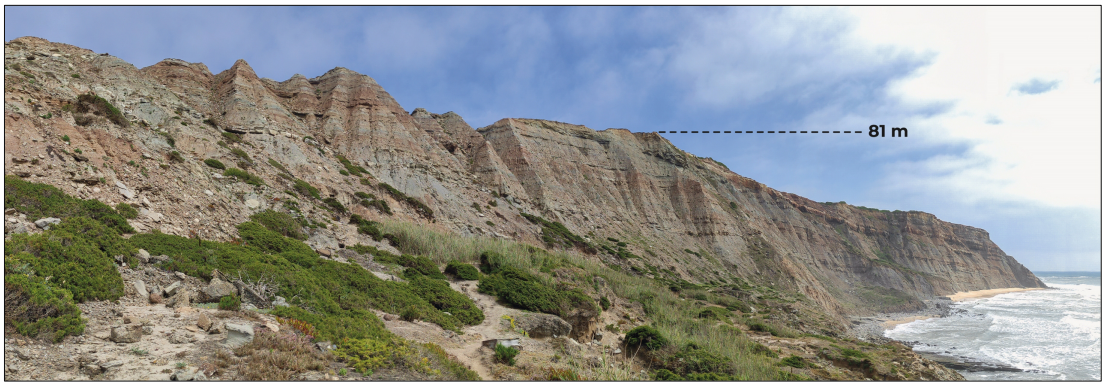


Figura 30 – Arriba alta, a norte da Ponta da Vela (30/05/21).

O **declive** (FIGURA 31B) é um dos critérios que define a estabilidade dos solos e rochas e representa uma forte influência na velocidade do escoamento superficial (PENACHO, 2012). Recorrendo aos dados LiDAR, as cristas das arribas indicam uma inclinação máxima de 79º na Praia das Camarinhas (Casal do Seixo); 77º na Praia Formosa; 75º em Porto dos Barcos/Porto Barril (a sul da Assenta); e mínimas de 1-2º em arribas cuja crista se encontra recuada em relação à base, apesar da altura elevada e eventuais faces alcantiladas, como na Praia das Conchas e em Porto Chão. Naturalmente, em determinados setores, o declive da face das arribas atinge os 90º e, por vezes, ângulos côncavos.

A **orientação da linha de costa** e das respetivas arribas (FIGURA 31C) é dominantemente para noroeste e oeste, à exceção do setor sul, entre Cambelas e o limite com a Praia do Porto Barril, em que é para oeste e sudoeste.

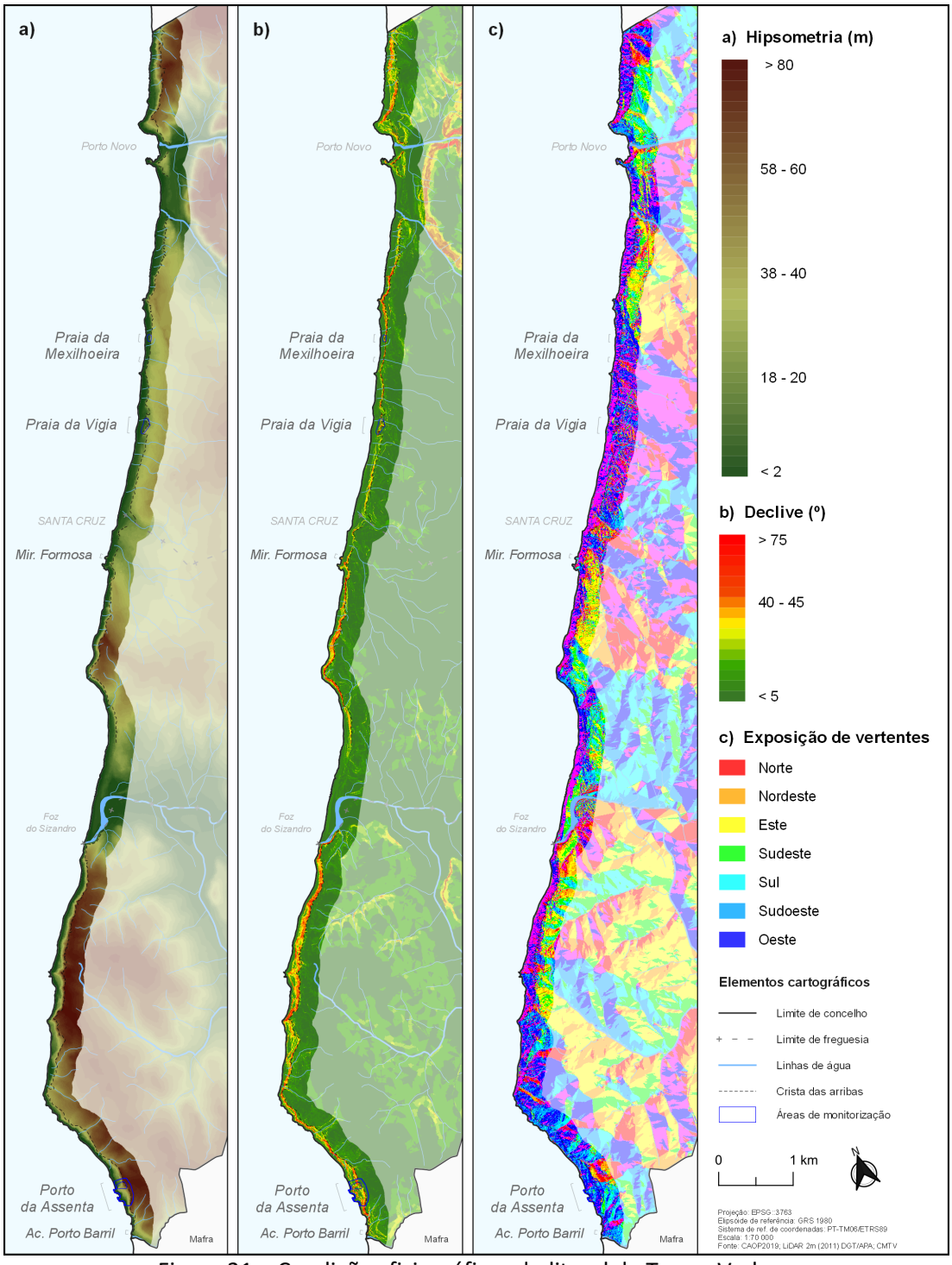


Figura 31 – Condições fisiográficas do litoral de Torres Vedras.

O concelho de Torres Vedras está integrado numa estrutura geológica designada por Bacia Lusitaniana, cuja evolução tectónica foi condicionada por falhas do episódio tardi-varisco que tiveram origem há 300-280 Ma (RIBEIRO ET AL., 1979 *IN* KULLBERG ET AL., 2006), e posteriormente dobrada e falhada durante a orogenia alpina (QUESADA & OLIVEIRA, 2019).

O litoral em estudo apresenta uma diversidade litológica muito forte (FIGURA 32 E FIGURA 34). Por vezes, na mesma arriba, podem ser encontrados materiais muito distintos que apresentam características (como a dureza ou a porosidade) diferentes e que, por isso, potenciam movimentos de vertente de grande complexidade bem como níveis de evolução distintos.

Considerando as Cartas Geológicas de Portugal 1:50 000 (30-A e 30-C), as unidades litológicas dos períodos Jurássico Superior e Inferior (201 Ma) e Cretácico Inferior (100 Ma), que afloram na faixa litoral, são respeitantes às seguintes formações: Formação da Lourinhã, Dagorda, Bombarral, Abadia, Almargem, Freixial e do Sobral (GOUVEIA, 2013; LEITÃO, 2013). Estas, são constituídas, essencialmente, por rochas carbonatadas (calcários e margas) e detríticas (areias, grés, argilas e conglomerados), com ocorrência de alguns filões de rochas ígneas (brecha vulcânica, basalto, dolerito e traquito).




Figura 32 - Diversidade litológica. Praia Formosa e Amoeiras (24/05/21).
Formação da Dagorda ($J^1_{Da}$) e Unidade da Praia das Amoeiras da Formação da Lourinhã ($J^3_{AP}$)
(Segundo MARQUES, PENACHO, ET AL. (2013) e GOUVEIA (2013).

Encontramos, ainda, a presença de dunas e aluviões correspondentes ao período Quaternário. Os sistemas dunares consistem em rampas eólicas, nas zonas da Praia de

Santa Rita e entre a Praia Azul e a Foz do Sizandro; e em dunas holocénicas (GOUVEIA, 2013) de cobertura do topo das arribas, entre Santa Rita Sul e a Praia da Vigia.

Os aluviões, compostos por lodos siltosos (GOUVEIA, 2013), encontram-se junto às fozes da Ribeira de Sorraia, do Rio Alcabrichel e do Rio Sizandro.

No terreno, evidencia-se a presença de falhas (FIGURA 33). Segundo as Cartas Geológicas (FIGURA 34), denotam-se sobretudo na área a norte de Porto Novo, Santa Cruz e entre Cambelas e Assenta. As falhas correspondem a *faixas de baixa resistência dos maciços* (GOUVEIA, 2013, P. 73), revelando-se um fator que contribui significativamente para a ocorrência de instabilidade nas arribas.




Figura 33 – Falha inversa junto ao Farol do Porto de Pesca da Assenta (28/02/21).

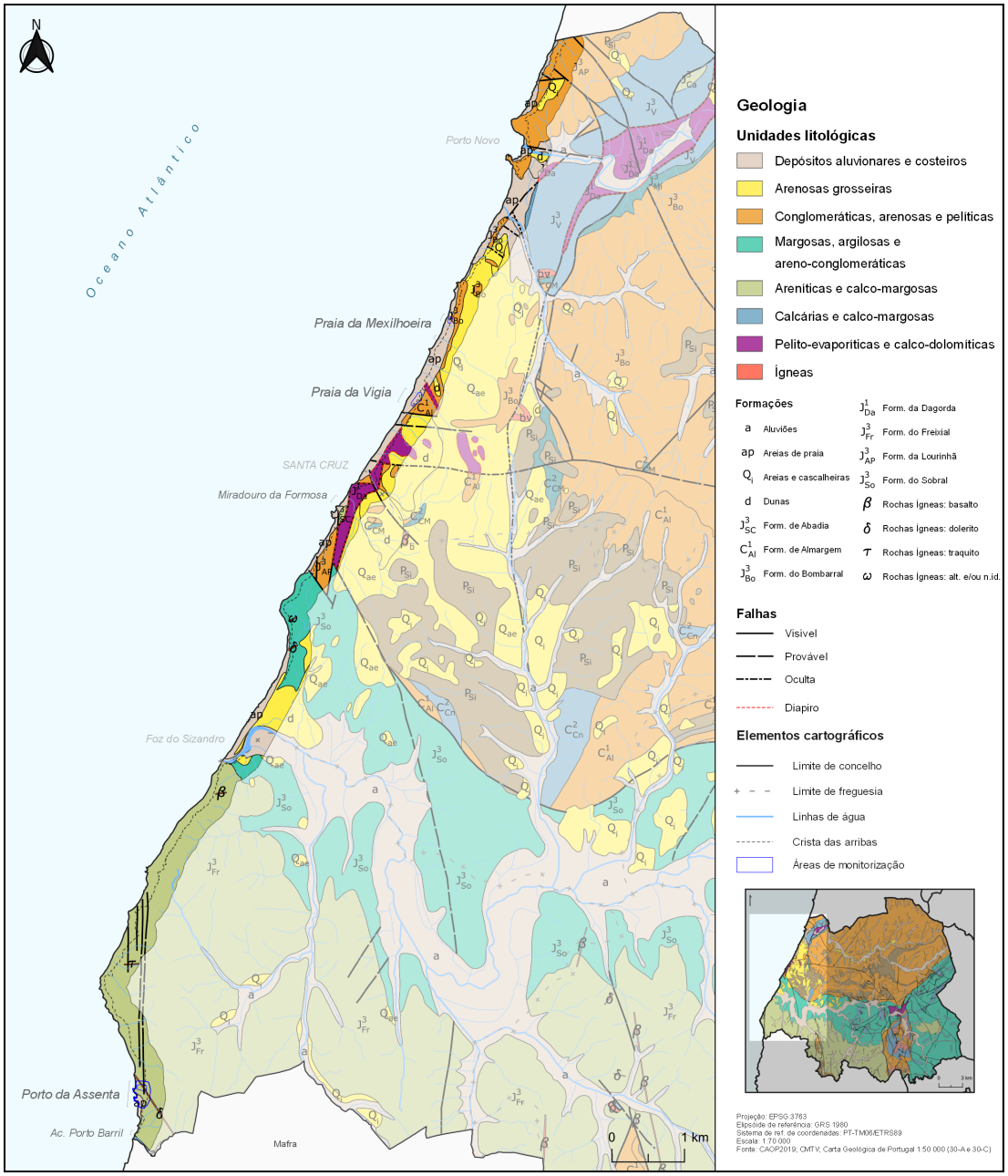



Figura 34 – Litologia e estrutura da faixa litoral do concelho de Torres Vedras.

### 3.1.2. Tipos de movimentos de vertente nas arribas de Torres Vedras

A ocorrência de movimentos de vertente é bastante influenciada por fatores de ordem geológica – como a litologia, a estrutura, a rede de fraturação ou a presença de formações superficiais; e ordem geomorfológica – morfologia das vertentes (côncava, convexa, retilínea), exposição, encaixes da rede de drenagem e coberto vegetal; e ainda de ordem antrópica – construções e alteração do perfil das arribas (M. TEIXEIRA, 2005).

No litoral de Torres Vedras, a instabilidade das vertentes costeiras é um risco muito presente. Ao longo da costa identificamos desde deslizamentos rotacionais (FIGURA 35) e translacionais (FIGURA 36), a fluxos e ravinamentos (FIGURA 37), quedas e tombamentos e, inclusivamente, a combinação entre os vários, sendo o mais comum o envolvimento de quedas (FIGURA 38).



Figura 35 – Deslizamento rotacional.
A norte da Praia das Peças (02/04/21).



Figura 36 – Deslizamento translacional.
Praia do Mirante (24/05/21).

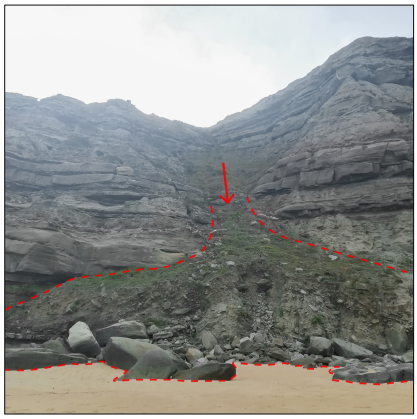


Figura 37 – Fluxo de detritos.
Praia de Porto Chão (18/05/20).



Figura 38 – Queda de blocos/detritos e deslizamento sobre a face da arriba.
Praia das Conchas (28/05/21).

Naturalmente que a interpretação de movimentos de vertente poderá sempre carecer de dados técnicos e factuais, dada a complexidade que é a identificação dos mesmos. No entanto, através de visitas de campo, da interpretação de imagens do *Google Earth*, de modelos tridimensionais e das cartas geológicas, foi elaborado o mapa sintético da FIGURA 39, representativo dos setores de arribas onde determinados tipos de movimentos de vertente já ocorreram ou são mais propensos a ocorrer futuramente.

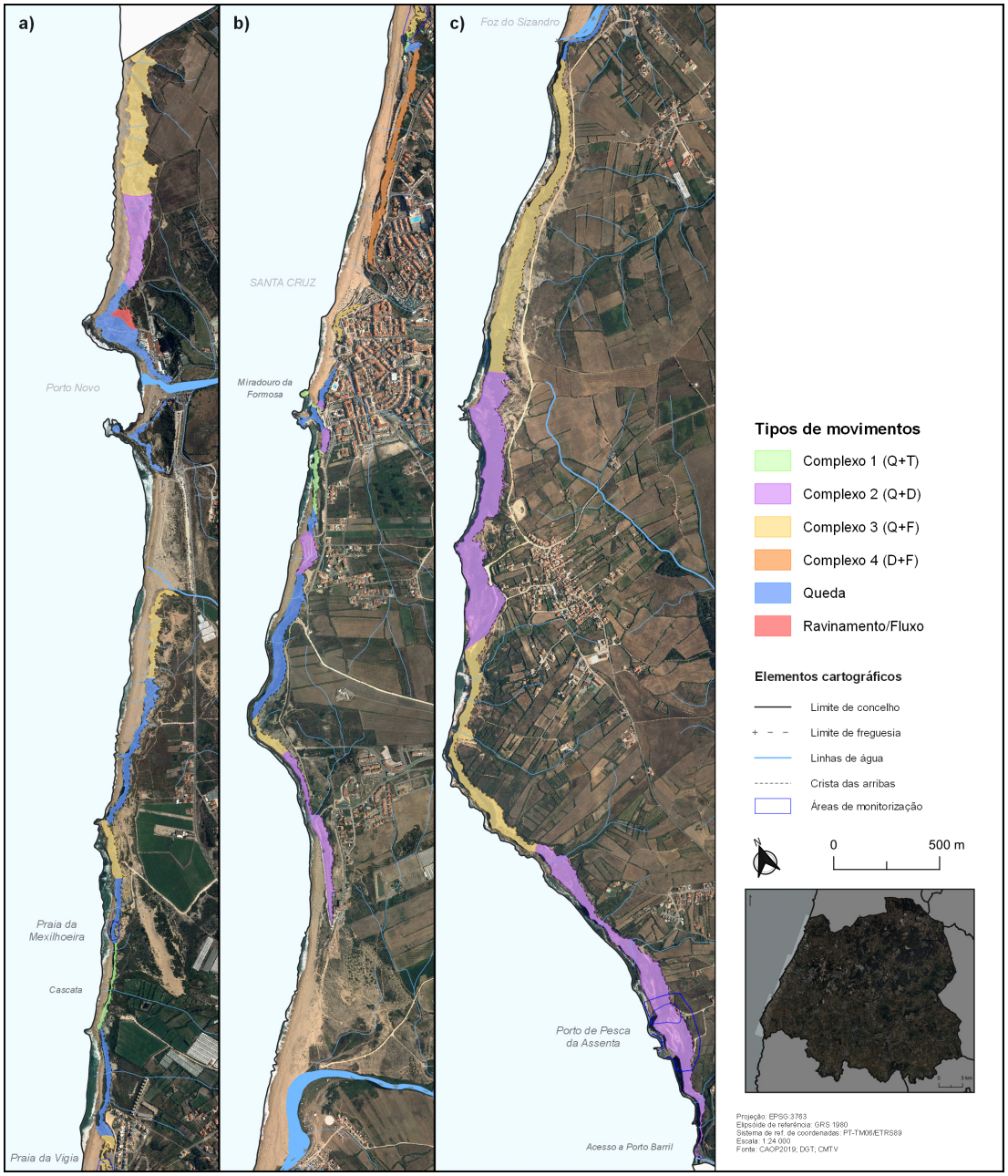



Figura 39 – Tipos de movimentos de vertente mais frequentes na faixa litoral de Torres Vedras.
(Q = quedas; T = tombamentos; F = fluxos/ravinamentos; D = deslizamentos)

## 3.2. Condições meteorológicas e oceanográficas

De forma a procurar uma relação que possa justificar possíveis movimentos de vertentes ocorridos, entre 1 de agosto de 2020 e 30 de abril de 2021 (FIGURA 40), foram recolhidos os dados relativos à temperatura, precipitação, vento e ondulação.

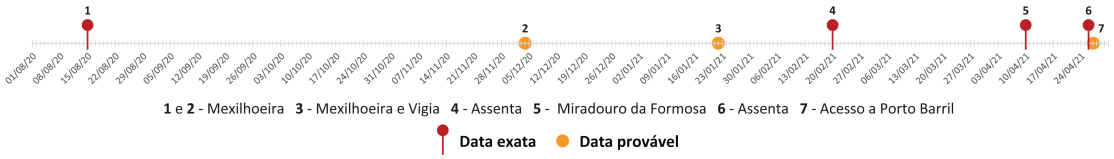



Figura 40 – Ocorrências significativas por data exata e por data provável.

Com maior ou menor intensidade, durante este período, Portugal continental foi afetado por 13 depressões, sendo a primeira ainda relativa à época 2019-2020(*) (TABELA 12).

**Tabela 12 – Tempestades que afetaram Portugal durante o período em estudo.**

| Nome | Data da nomeação | | | Serviço Meteorológico | Altura máxima das ondas (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| *Ellen | 18 | agosto | 2020 | Met Éireann | 6,6 |
| Alex | 1 | outubro | 2020 | Météo-France | 8,7 |
| Barbara | 18 | outubro | 2020 | AEMET | 5,5 |
| Clement | 28 | novembro | 2020 | IPMA | 7,3 |
| Dora | 3 | dezembro | 2020 | AEMET | 13,9 |
| Ernest | 7 | dezembro | 2020 | AEMET | 7,3 |
| Filomena | 5 | janeiro | 2021 | AEMET | 5,5 |
| Gaetan | 19 | janeiro | 2021 | IPMA | 2,7 |
| Hortense | 20 | janeiro | 2021 | AEMET | 6,9 |
| Ignacio | 22 | janeiro | 2021 | AEMET | 9,4 |
| Justine | 26 | janeiro | 2021 | IPMA | 4,7 |
| Karim | 17 | fevereiro | 2021 | AEMET | 8,2 |
| Lola | 21 | abril | 2021 | IPMA | 7,4 |

Fonte: http://www.aemet.es/es/conocermas/borrascas/2020-2021 / Instituto Hidrográfico

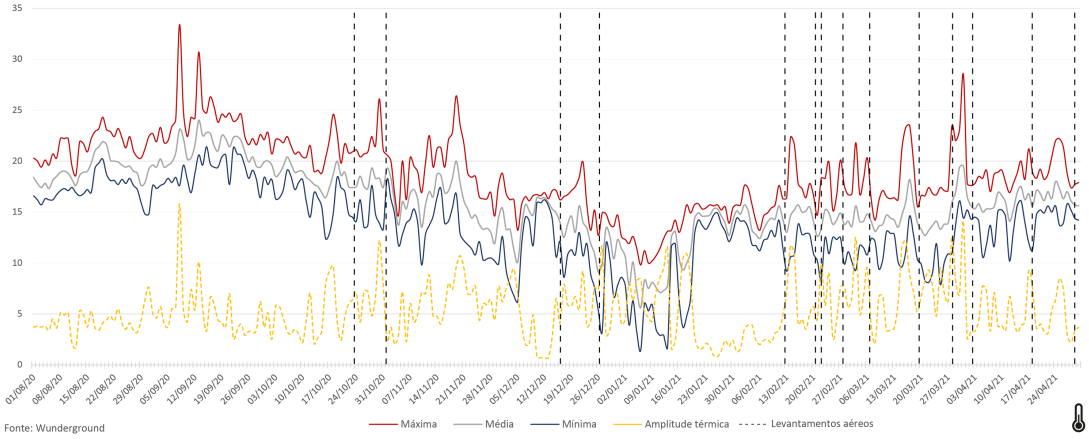
### 3.2.1. Temperatura

O aquecimento e arrefecimento leva à expansão e contração das rochas – processo denominado de termoclastia. Essa amplitude térmica, quando brusca, contribui para a desintegração do material rochoso e para a fraturação das rochas, potenciando a sua instabilidade (BIRD, 2016).

Durante o período de monitorização, evidenciam-se no GRÁFICO 1 os picos de temperatura máxima na primeira semana de setembro de 2020 (33,4ºC) e de abril de

2021 (28,5ºC); e mínimas inferiores a 5ºC durante a primeira quinzena de janeiro de 2021. Mas, como referido, devemos ter em conta a amplitude térmica, cujos valores se situam entre 10,1ºC e 15,8ºC de diferença em 10 dos 273 dias registados.

**Gráfico 1 – Temperatura diária (ºC).**

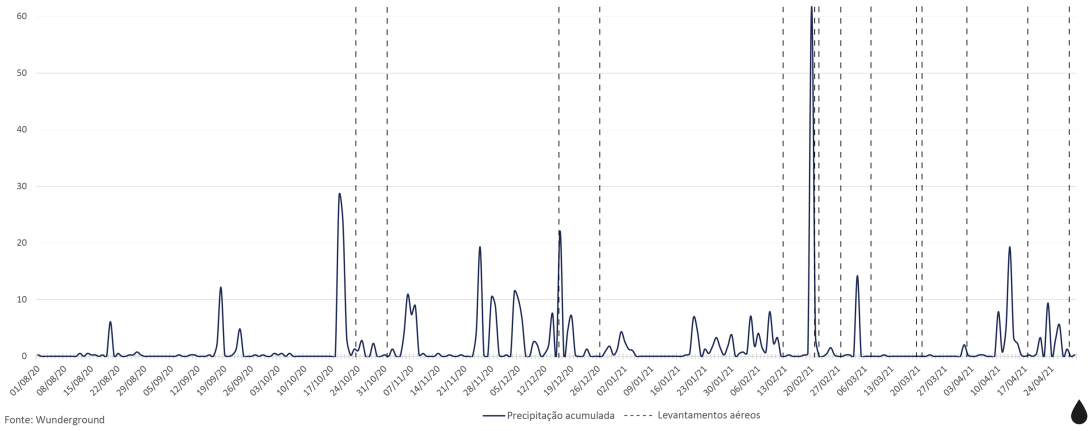



### 3.2.2. Precipitação

A precipitação é um agente erosivo que atua sobre as rochas de diferentes formas. O fluxo da água da chuva, escoando superficialmente, pode remover sedimentos e formar canais de escoamento, como ravinas. Consoante o tipo de rocha, esta pode permitir a infiltração de água levando à sua saturação, à abertura de fendas ou, no caso de rochas solúveis, à sua dissolução.

No GRÁFICO 2 verificamos a ocorrência de precipitação acumulada cujos valores ultrapassam os 10 mm em 12 de 273 dias. Excecionalmente, no dia 20 de fevereiro de 2021 foi registado 62 mm de precipitação acumulada à passagem da depressão *Karim*.

**Gráfico 2 – Precipitação acumulada (mm).**

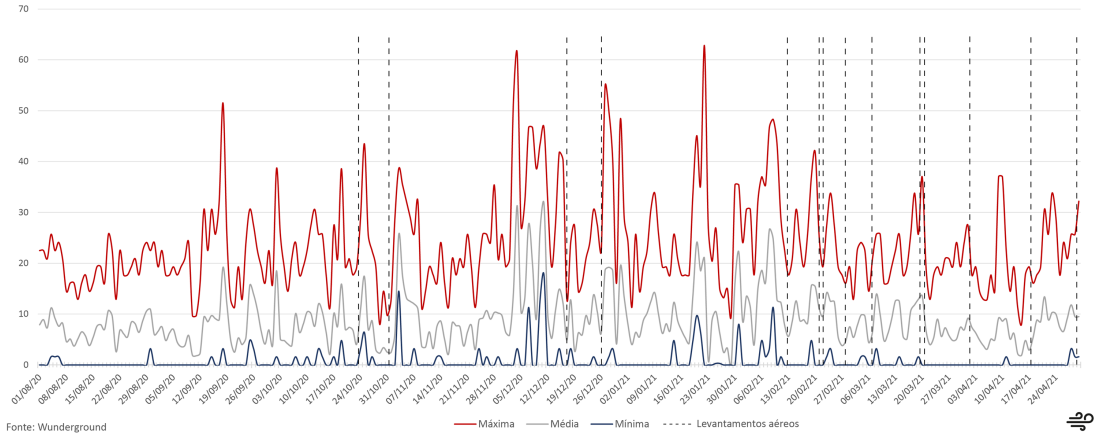


### 3.2.3. Vento

O vento é um elemento que transporta sedimentos pelo ar e que, por atrito, desgastam as rochas, podendo formar cavidades e fendas (BIRD, 2016). Além disso, o vento tem também efeito na ondulação e na produção de ondas de tempestade.

A velocidade média do vento ao longo do período de monitorização foi de 9,1 km/h (GRÁFICO 3). Segundo os dados da estação meteorológica de referência (com intervalos de 15 minutos), foram registadas 219 rajadas de ventos superiores a 50 km/h. As rajadas mais fortes, entre 80 e 84 km/h foram registadas nos dias 22 de janeiro de 2021, e 28 e 4 de dezembro de 2020.

**Gráfico 3 – Velocidade do vento (km/h).**

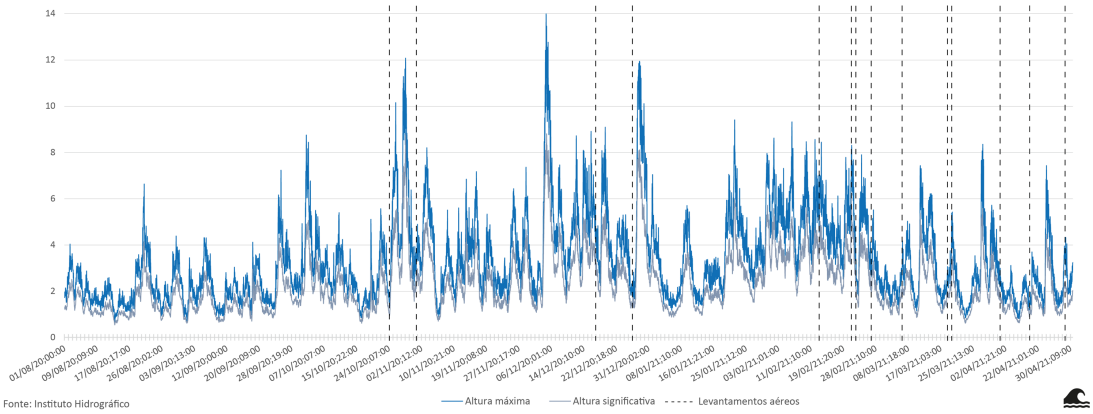



### 3.2.4. Ondulação

A energia das ondas é uma das principais causas da recessão das arribas, resultado da pressão hidráulica do seu impacto. Quando as ondas transportam fragmentos de rochas (como areia ou seixos) a abrasão é intensificada, sobretudo na base das arribas (BIRD, 2016).

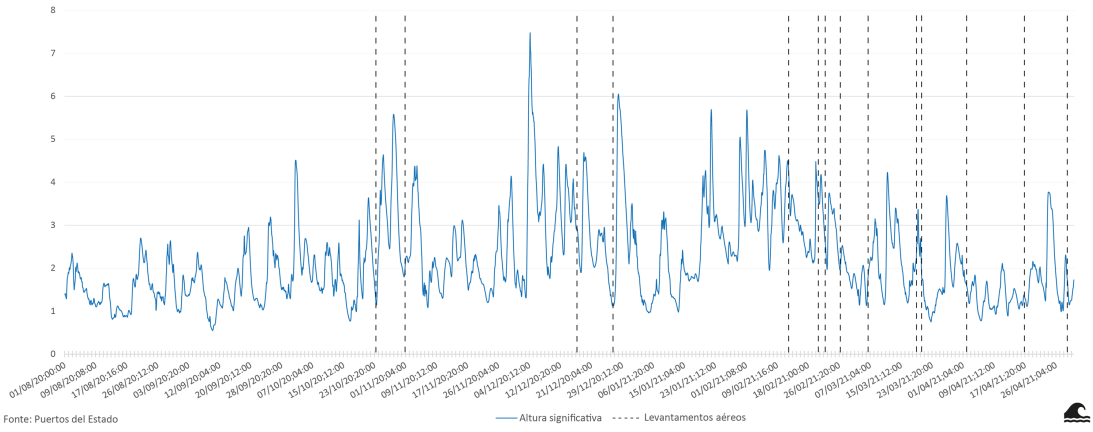
O GRÁFICO 4 representa a altura máxima e significativa real das ondas, por hora, registada pela boia *Nazaré costeira*. A altura máxima registada corresponde a 14 metros no dia 4 de dezembro de 2020 e a 12 metros no dia seguinte, à passagem da tempestade Dora. A altura significativa média foi de 2,3 metros.

**Gráfico 4 – Altura máxima das ondas (m) registada pela boia *Nazaré costeira*.**




Em comparação, o GRÁFICO 5 representa somente a altura significativa das ondas, por hora, calculada através do modelo numérico respeitante ao ponto SIMAR 1042056. O valor máximo da altura significativa no dia 4 de dezembro de 2020 foi de 7,5 metros, sendo ligeiramente inferior ao registado pela boia da Nazaré. O valor médio da altura significativa foi de 2,2 metros.

**Gráfico 5 – Altura significativa das ondas (m) segundo modelo numérico.**



## 3.3. Identificação e interpretação de processos erosivos nas arribas

Os produtos gerados a partir da metodologia descrita, permitem que seja armazenada a informação espacial e temporal de determinado sítio, estando qualquer ponto de vista à data dos levantamentos, acessível sempre que desejável. Por exemplo, se for necessário consultar a quantos metros a crista de uma vertente se encontra de uma estrada no seu topo em determinada data, tal pode ser facilmente consultado sem necessidade de deslocação ao local ou pode, também, servir como registo e comparação para casualidades futuras.

### a) Praia da Mexilhoeira

A área de estudo da Praia da Mexilhoeira (FIGURA 41) localiza-se a sul de Santa Rita, na freguesia de A-dos-Cunhados e Maceira. Foi dividida num troço correspondente à área que envolve uma cascata e, noutro, alvo de monitorização devido ao seu potencial de instabilidade. A área monitorizada, com aproximadamente 1 ha, divide a Praia do Seixo – a norte, procurada sobretudo por alguns pescadores e mariscadores – e a praia seminatural da Mexilhoeira – a sul, frequentada por veraneantes durante a época balnear, e surfistas.



Figura 41 – Área de monitorização: modelo texturizado da Praia da Mexilhoeira (07/03/21).

Litologicamente (FIGURA 43A), a arriba desta área é constituída pela Formação do Bombarral ($J^3_{Bo}$), de idade Titoniana (Jurássico Superior, 152-145 Ma), na qual podemos identificar bancadas intercaladas (dispostas horizontalmente) de arenitos na parte superior, e argilas na parte inferior (MARQUES, PENACHO, ET AL., 2013). Na base encontramos areias de praia e blocos detríticos provenientes de movimentos de vertente; e, no topo, areia grosseira sendo que, em direção a terra, encontram-se dunas holocénicas.

Na zona envolvente existem campos agrícolas e estufas, bem como diversas bacias hidrográficas de pequena/média dimensão (nomeadamente uma linha de água popularmente denominada *água do Seixo*), pelo que a água costuma existir em abundância, de tal forma que encontramos diversas exsurgências (FIGURA 42) e cascatas ao longo deste segmento (sobretudo durante o inverno), o que favorece a ocorrência de vegetação mas também de instabilidade das arribas devido à erosão diferencial e à saturação das rochas. Segundo GOUVEIA (2013), esta água em domínio terrestre poderá estar relacionada com um aquífero superficial e que, inclusivamente, são conhecidas captações na Formação do Bombarral e nas dunas Holocénicas de Santa Cruz.



Figura 42 – Exsurgência e erosão basal das camadas argilosas na Praia da Mexilhoeira (junho de 2020).

No troço monitorizado, a altitude mínima ronda 1 metro (consoante o perfil da praia e o nível do mar) e a máxima é de 33 metros (FIGURA 43B). Quanto ao declive, verificamos uma face vertical acentuada, apresentando valores que atingem os 89° (FIGURA 43C).

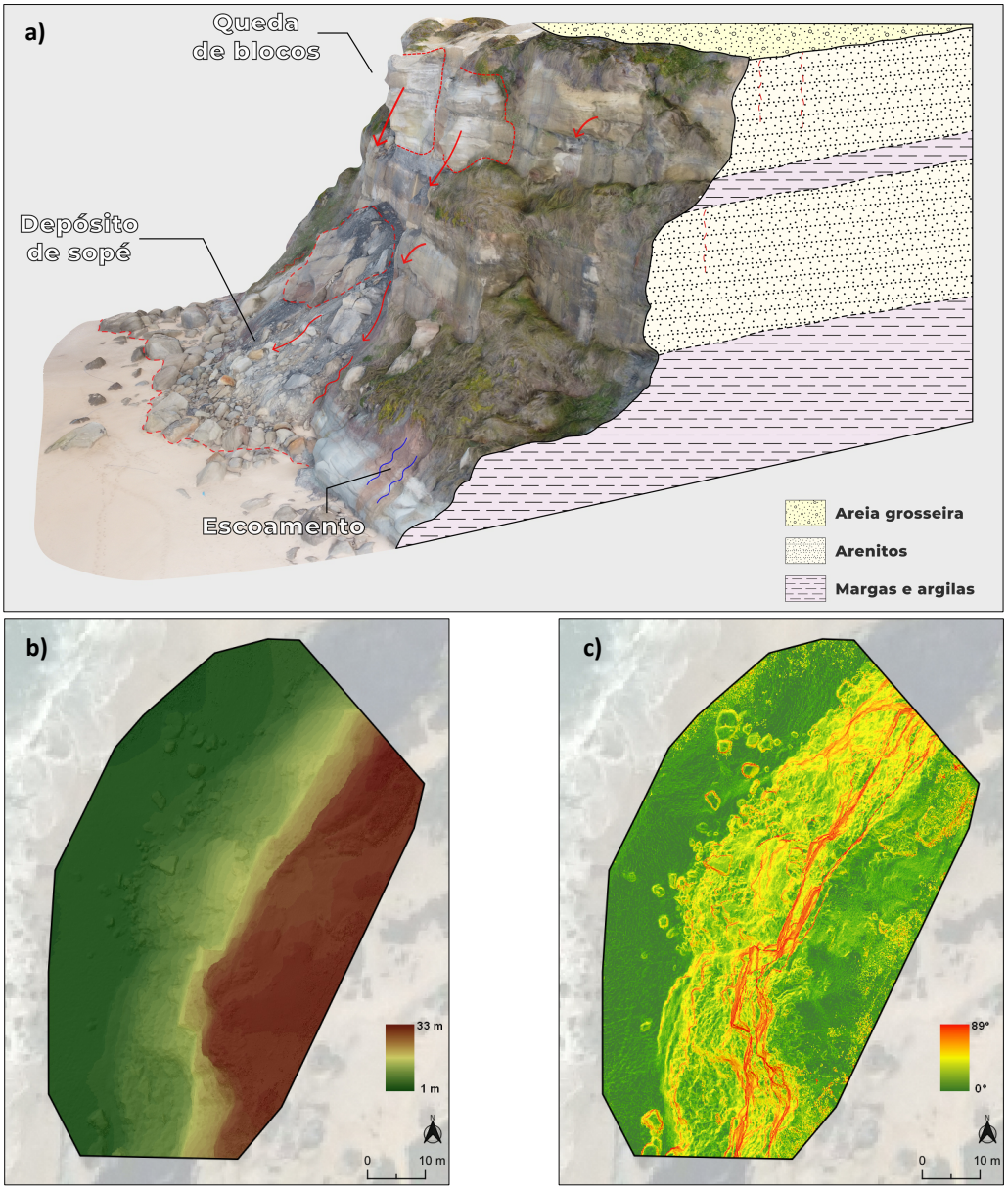



Figura 43 – Enquadramento da área de estudo da Praia da Mexilhoeira.
a) Litologia e estrutura; b) Hipsometria; c) Declive.

Um dos processos que identificamos – a erosão basal – deve-se à diferença entre os materiais rochosos da arriba, especificamente entre os arenitos (de maior resistência) e as margas e argilas (de menor resistência). A ação mecânica das ondas nas rochas de menor resistência leva à formação de sapas e, por sua vez, à perda de sustentação dos materiais superiores, representando um elevado risco de queda dessas vertentes (FIGURA 42 E FIGURA 44).

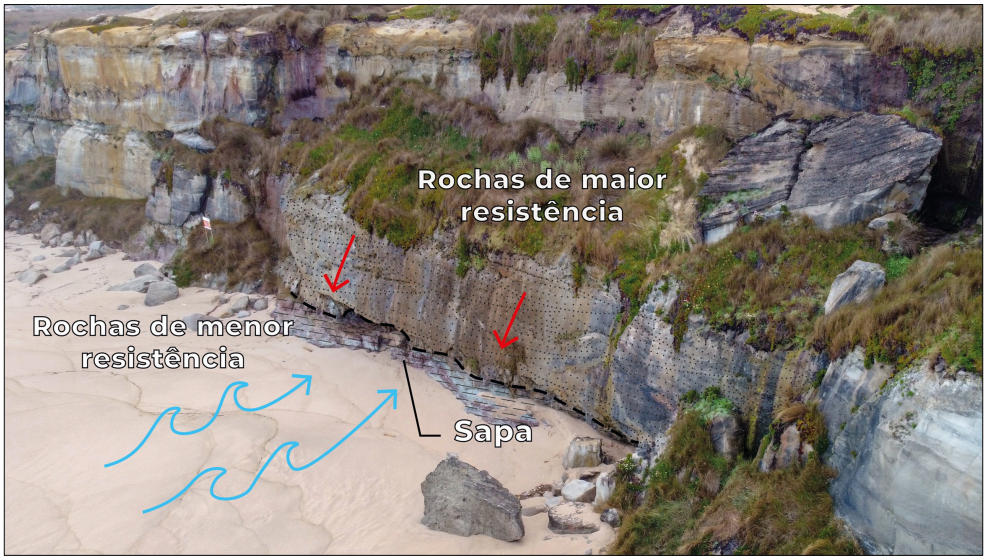



Figura 44 – Erosão basal com formação de sapa nas rochas de menor resistência. Praia da Mexilhoeira (02/04/21).

A proteção da base das arribas pode ser naturalmente proporcionada pela presença de areia e de blocos, impedindo ou condicionando as investidas do mar. A FIGURA 45 demonstra, após a exposição da arriba à ação do mar, a recuperação de areia na *área-exemplo* da Cascata da Praia da Mexilhoeira depois da passagem da depressão *Karim*, a 20 de fevereiro de 2021.



22 de fevereiro de 2021 — 7 de março de 2021

20 de março de 2021 — 2 de abril de 2021

Figura 45 – Alterações na base da arriba da Praia da Mexilhoeira.

Dependente dos materiais rochosos, podemos constatar a influência dos processos de escoamento subterrâneo e superficial que contribuem para a alteração geomórfica das arribas, quer por desgaste das rochas, quer por potenciar a instabilidade. Na FIGURA 46 verificamos que uma camada superior constituída, essencialmente, por areia grosseira no topo e arenitos permite a circulação de água tanto à superfície como subterraneamente, até alcançar as margas e argilas que funcionam como uma barreira à circulação da água, obrigando-a a escoar na interface arenito-argila. A bacia hidrográfica converge num único ponto e forma uma cascata que, com a ação contínua da água, levou à formação de uma *plunge pool*. Evidencia-se, ainda, a forte presença de vegetação no topo e na face da arriba.

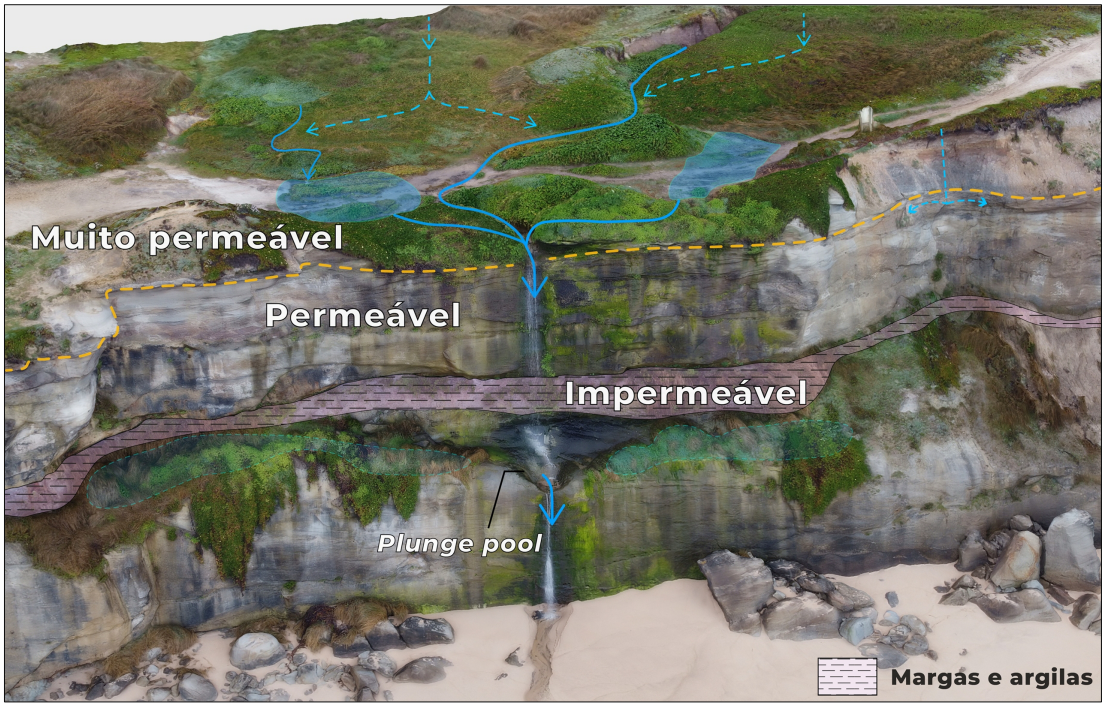


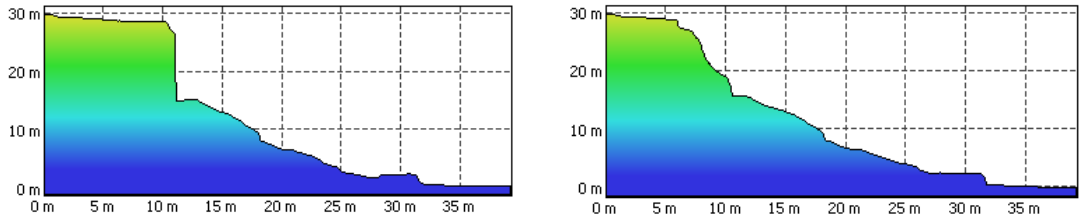

Figura 46 – Exemplo da variação da permeabilidade da arriba em função da litologia e processos de escorrência subsuperficial associados. Praia da Mexilhoeira (02/04/21).

Ainda na Praia da Mexilhoeira, na *área de monitorização*, logo após o primeiro voo, foi percetível a presença de um bloco (ca. de 127 $m^3$) que se encontrava instável devido a uma fenda no topo da arriba (FIGURA 47). Ainda que não fosse possível estimar a data do seu desmoronamento, a garantia da sua instabilidade iminente era dada pela evolução da forma da fenda e na sua própria dilatação em cerca de 2 centímetros entre 1 de novembro e 27 de dezembro de 2020. Este bloco viria a cair entre o período de 27 de

dezembro de 2020 e 13 de fevereiro de 2021, levando ao recuo de 4,5 metros da crista da arriba nesse setor (FIGURA 48).




Figura 47 – Dilatação de fenda e queda de bloco na Praia da Mexilhoeira.




27 de dezembro de 2020 13 de fevereiro de 2021

Figura 48 – Perfil topográfico transversal à crista da arriba na Praia da Mexilhoeira, onde ocorreu a queda do bloco.

A possibilidade de se verificar, em segurança, se uma determinada vertente apresenta sinais de instabilidade revela-se verdadeiramente importante em áreas críticas durante todo o ano (como junto a infraestruturas, acessos de pescadores e trilhos pedestres no topo das arribas), ou em qualquer área onde ocorrem estas vertentes, especialmente antes do início da época balnear e, se necessário, durante a mesma.

À data do último voo sobre esta área, no âmbito do presente trabalho e, portanto, antes do início da época balnear, constatámos que se encontravam – além de pequenos detritos soltos na face – pelo menos dois conjuntos de blocos em risco de queda a curto prazo (assinalados a vermelho na FIGURA 49) devido à fraturação existente, totalizando uma massa de aproximadamente 95 $m^3$.




Figura 49 – Blocos instáveis.
Praia da Mexilhoeira (18/04/21).

### b) Praia da Vigia

A Praia da Vigia (FIGURA 50), também conhecida como Praia do Amanhã, localiza-se na freguesia de A-dos-Cunhados e Maceira, a norte de Santa Cruz. É uma praia urbana com um extenso areal, boa acessibilidade e muito procurada por veraneantes.



Figura 50 – Área de monitorização: modelo texturizado da Praia da Vigia (22/02/21).

A área de monitorização, de 1,5 ha, corresponde à Formação de Almargem ($C^1_{Al}$) (Cretácico Inferior, 129-113 Ma), constituída por siltes, argilas e grés finos a grosseiros, com uma inclinação de 30° para SE e uma direção aproximada NE-SW (GOUVEIA, 2013).

Esta diferença litológica (FIGURA 51A) leva à ocorrência de fluxos e ravinamentos no material mais brando, e quedas e tombamentos na área de material arenítico. De salientar que as extremidades norte e sul desta praia contactam por falha com a Formação da Dagorda ($J^1_{Da}$), constituída por membros pelito-evaporíticos e calco-dolomíticos (GOUVEIA, 2013).

Dependendo do perfil da praia emersa, a altitude mínima da área em estudo é de ca. de 3 metros e a máxima de 35 metros (FIGURA 51B). O declive, em todo o plano da arriba, varia entre os 0° e os 90°, acentuando-se sobretudo na estrutura de arenito que contribui para a ocorrência das quedas de blocos (FIGURA 51C).

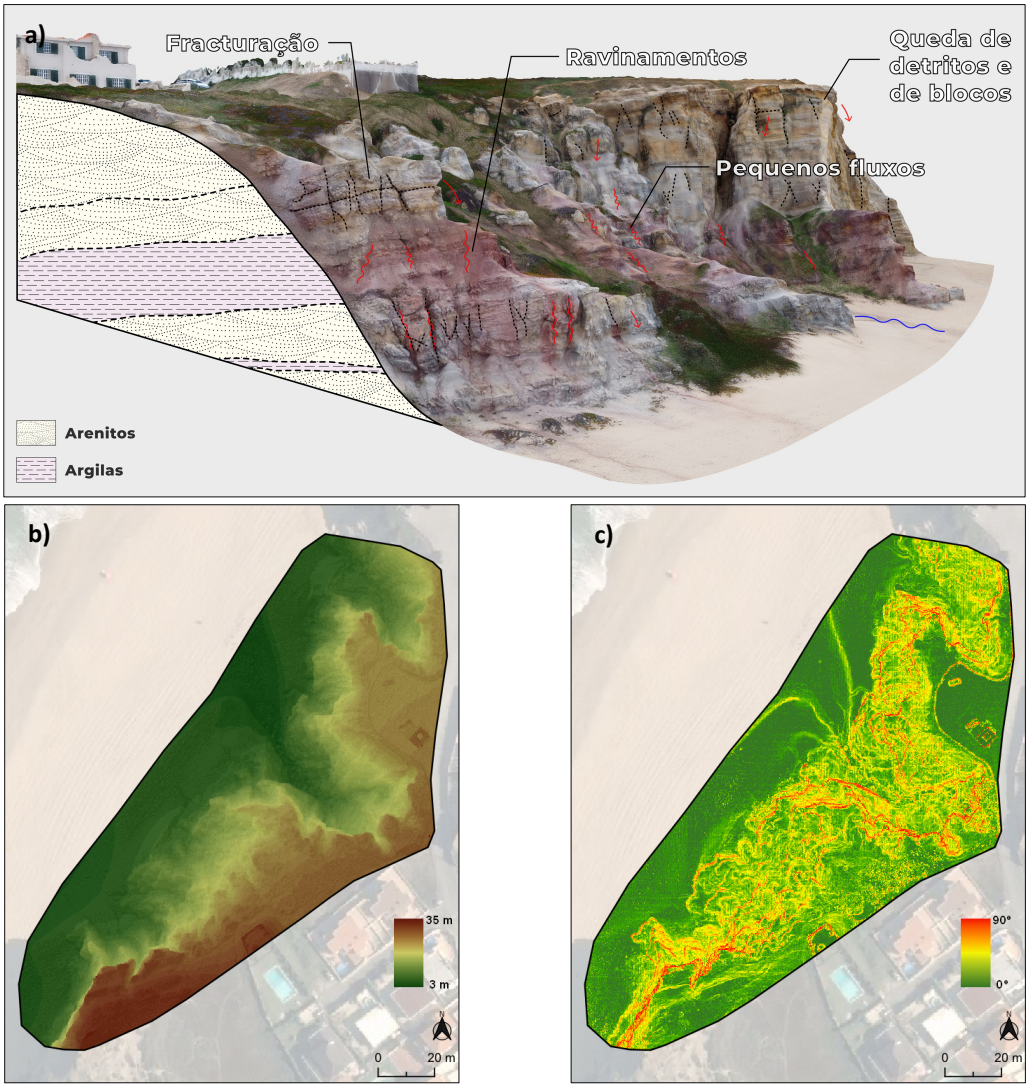



Figura 51 – Enquadramento da área de estudo da Praia da Vigia.
a) Litologia e estrutura; b) Hipsometria; c) Declive.

Os modelos tridimensionais permitem-nos observar de perto a fraturação nas rochas areníticas da Praia da Vigia. Semelhante ao caso anterior, era possível encontrar um bloco saliente na face da arriba (ca. de 33 $m^3$), cuja queda era prevista, mas sem a possibilidade de apontar uma data. A queda desse bloco, cuja sustentação era fraca, viria a acontecer sensivelmente no mesmo intervalo temporal em que ocorreu a queda do bloco na área anterior, ou seja, entre 17 de dezembro de 2020 e 13 de fevereiro de 2021 (FIGURA 52).

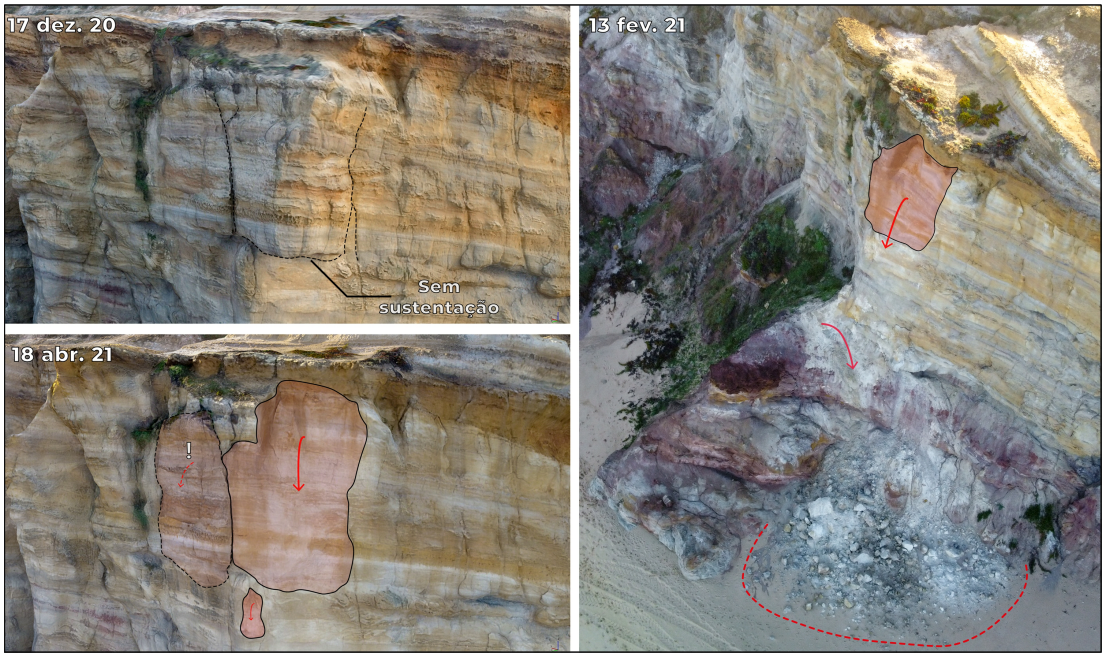



Figura 52 – Queda de bloco.
Praia da Vigia, 17 de dezembro de 2020 e 18 de abril de 2021.

Podemos, também, apontar a possibilidade de observar outros processos neste setor, como o escoamento superficial, que promove a formação de ravinamentos nas rochas de menor resistência e contribui para pequenos fluxos e acumulação, enquanto no material de maior resistência, a fraturação que possui favorece as quedas de blocos (FIGURA 53).

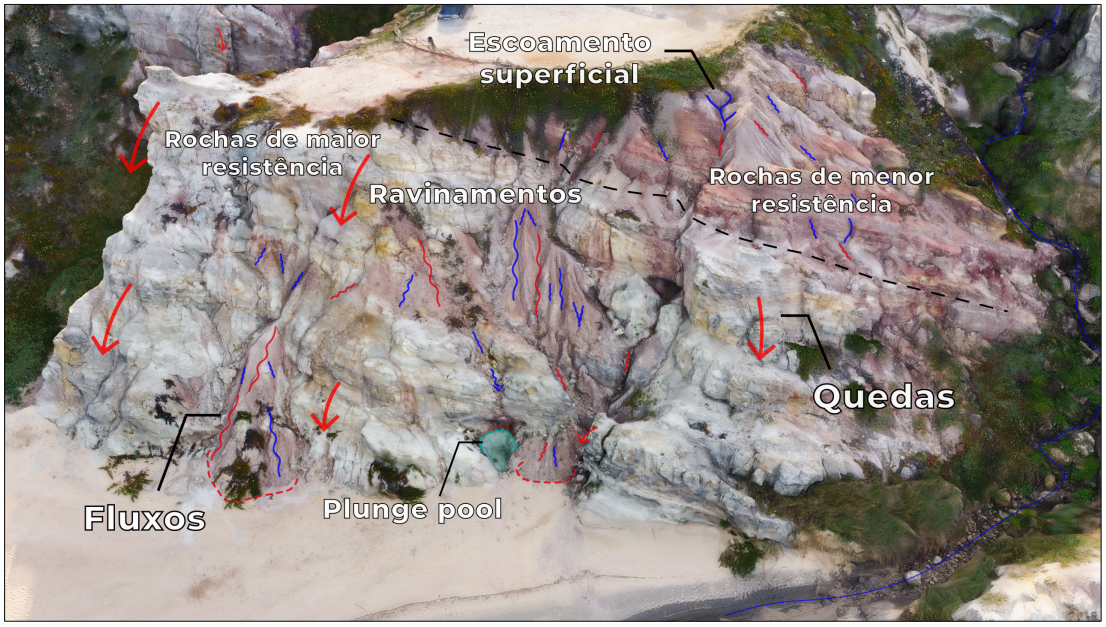



Figura 53 – Processos erosivos na Praia da Vigia (18/04/21).

### c) Porto de Pesca da Assenta

O Porto de Pesca da Assenta (FIGURA 54) localiza-se junto da localidade da Assenta, na freguesia de São Pedro da Cadeira. Recentemente, foi alvo de uma requalificação que visa a *proteção do ambiente e a melhoria das condições de trabalho e de segurança para os pescadores*. À data deste trabalho, encontrava-se em estudo a operação de estabilização de uma arriba por parte da Câmara Municipal.

No topo da arriba encontra-se uma moradia, o antigo Posto da Guarda Fiscal (em reabilitação) e um farol – onde em 2018 se procedeu ao desmonte controlado de parte da arriba, por se encontrar instável – e, na face, algumas edificações, nomeadamente instalações de apoio à pesca e um restaurante.

A praia, de blocos e esporadicamente com areia, é de pequena dimensão ou inexistente, especialmente durante a maré cheia.

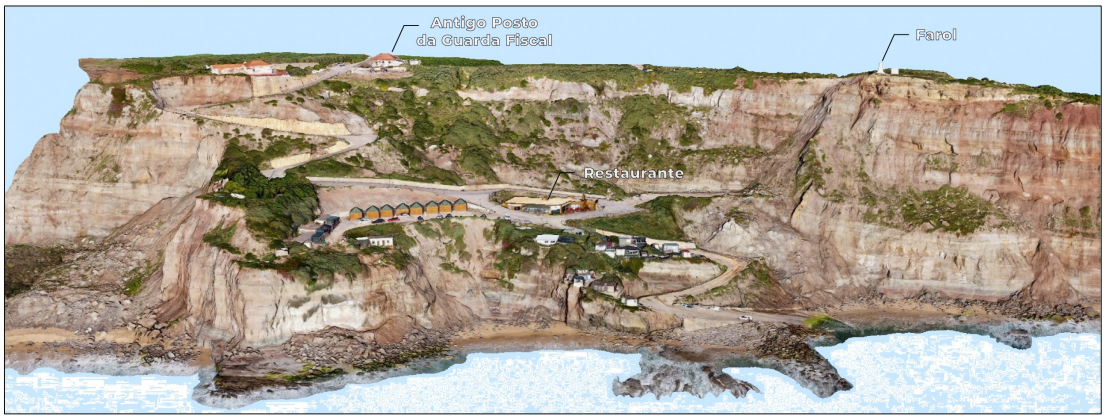



Figura 54 – Área de monitorização: modelo texturizado da área do Porto de Pesca da Assenta (29/04/21).

Esta área insere-se na Formação do Freixial ($J^{3}_{Fr}$), constituída por arenitos e argilas (micáceas e arenosas), alternando com margas e calcários margosos do Titoniano (Jurássico Superior, 152-145 Ma), verificando-se a presença de um filão dolerítico associado a falha N47°W (MARQUES, PENACHO, ET AL., 2013, P. 99) (FIGURA 33 E FIGURA 55A).

A altura máxima das arribas é de 75 metros, sendo que o MDS indica 81 metros devido ao edifício do antigo Posto da Guarda Fiscal (FIGURA 55B). O declive mínimo verificado é de 0° e máximo de 90° (FIGURA 55C).

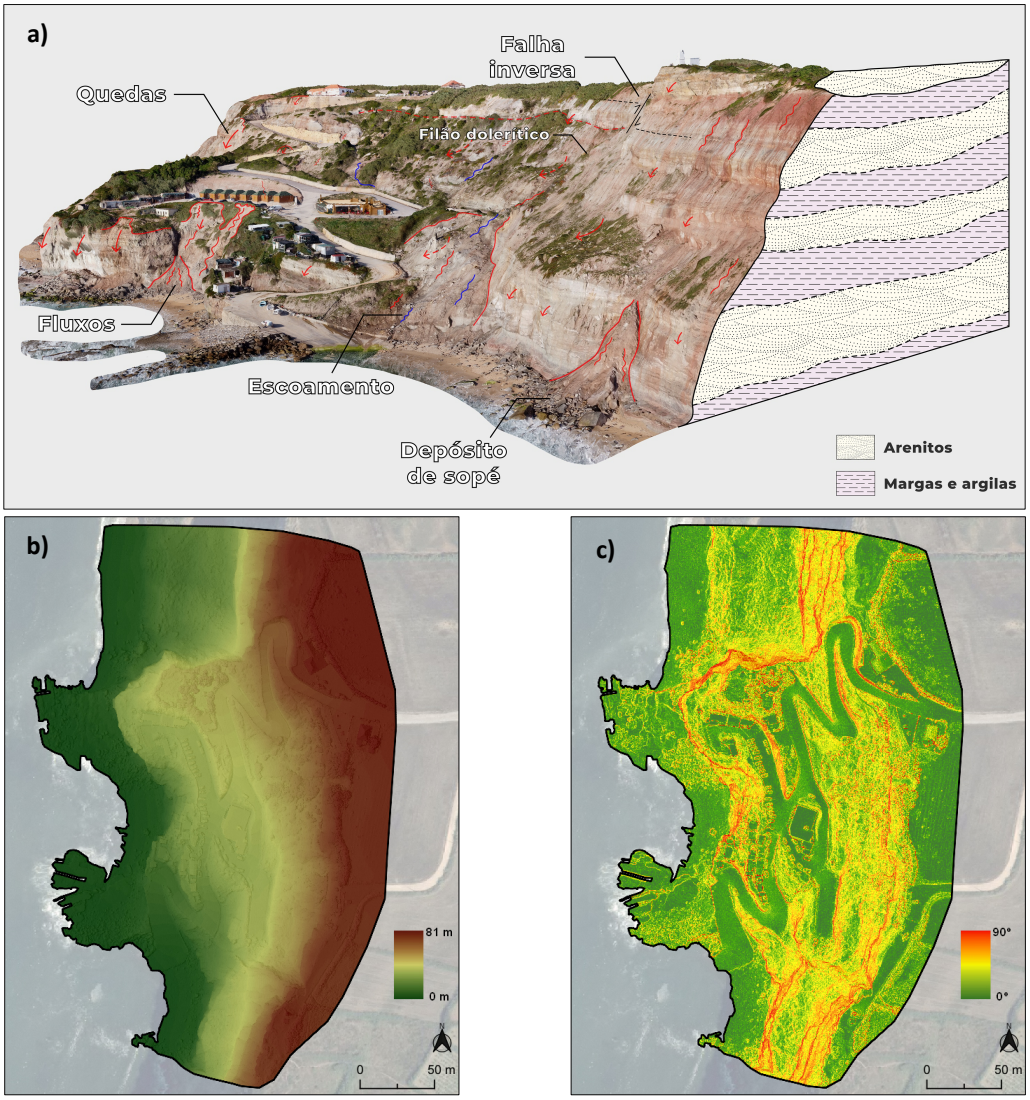



Figura 55 – Enquadramento da área de estudo do Porto de Pesca da Assenta.
a) Litologia e estrutura; b) Hipsometria; c) Declive.

A FIGURA 56 representa a dinâmica desta área pela ocorrência de diferentes tipos de movimentos de vertente, a forte ação marinha que trabalha a base da arriba apesar dos depósitos de sopé, e a influência do escoamento superficial que alimenta fluxos devido à presença de material areno-argiloso.

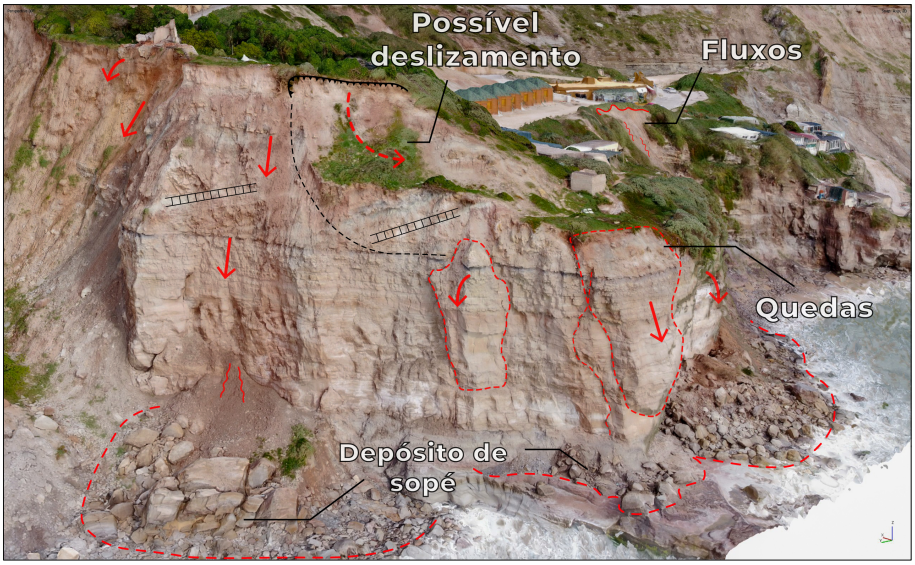



Figura 56 – Processos erosivos no Porto de Pesca da Assenta (29/04/21).

Através de fotocomparação entre uma fotografia aérea de 2016 (©SIARL) e o modelo tridimensional referente a 18 de abril de 2021, é possível identificar uma série de alterações no perfil das arribas: uma área intervencionada, um deslizamento que empurrou um muro de contenção, quedas de detritos e de blocos, e fluxos alimentados por escoamento superficial (FIGURA 57).




Figura 57 – Fotocomparação.
Porto de Pesca da Assenta: a) 16 de novembro de 2016 ©SIARL; b) 18 de abril de 2021.

### d) Praia das Conchas

A Praia das Conchas ou Corva localiza-se entre Porto Novo e o limite norte do concelho. O seu areal estende-se por mais de um quilómetro, mas, durante as marés muito altas pode ficar totalmente submerso. As arribas atingem alturas superiores a 70 metros e o declive na face varia entre áreas aplanadas e faces muito acentuadas.

A FIGURA 58 representa sucessivos deslizamentos rotacionais, formando diversos patamares relativamente aplanados, bem como a forte influência do escoamento superficial que leva à formação de ravinamentos ao longo das rochas areníticas e argilosas.

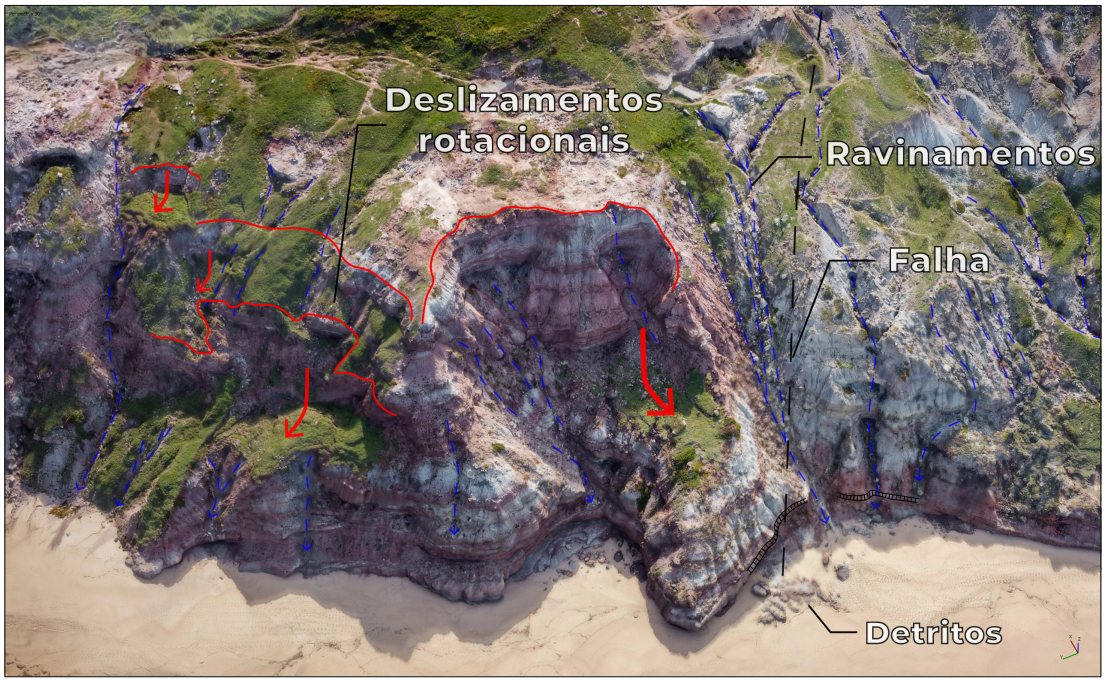



Figura 58 – Processos erosivos na Praia das Conchas (08/04/21).

Ao analisarmos o modelo tridimensional em quase toda a sua totalidade, podemos afirmar a possibilidade da ocorrência de um deslizamento rotacional de grandes dimensões, que poderá ter resultado no abatimento de uma área superior a 10 000 $m^2$ (FIGURA 59).




Figura 59 – Possível deslizamento rotacional de grandes dimensões.
Praia das Conchas (08/04/21).

### e) Miradouro da Formosa

A queda de terras e o deslizamento do material sobre a face da arriba, a 10 de abril de 2021, junto ao miradouro da Formosa, em Santa Cruz, levou-nos a registar esse sítio para identificar qual a significância de um possível recuo. O fator desencadeante será, possivelmente, a precipitação, tendo sido registado 7 mm na manhã desse mesmo dia.

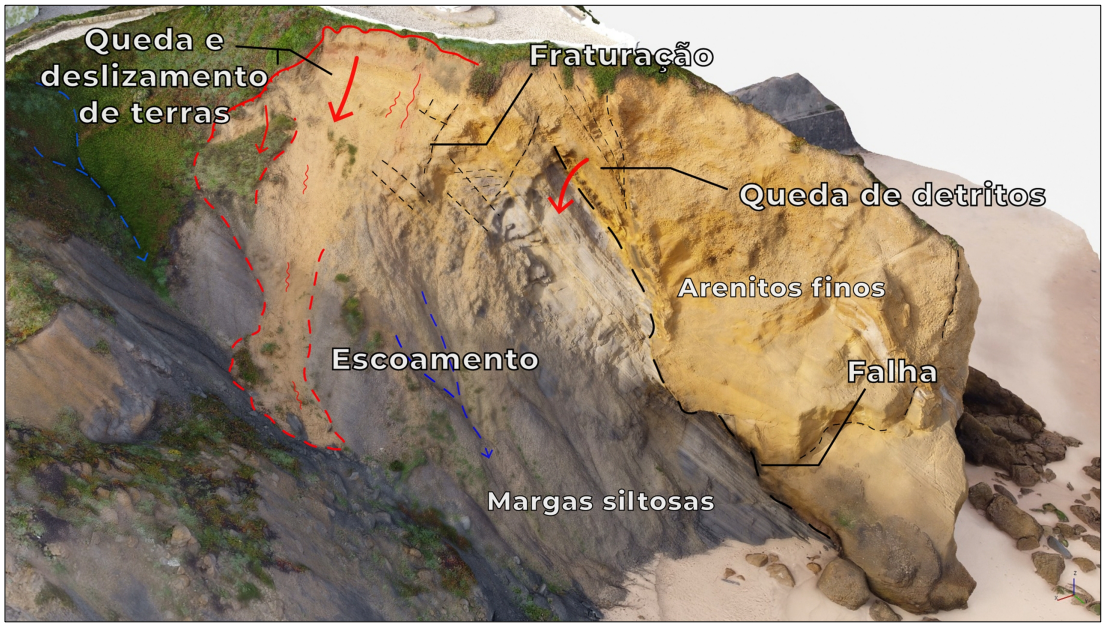



Figura 60 – Processos erosivos no Miradouro da Formosa (14/04/21).

Na FIGURA 60 é possível identificar o trajeto dos detritos ao longo de 20 metros na face da arriba, a fraturação no material arenítico e o contacto por falha entre os materiais diapíricos da Formação da Dagorda e o Membro do Guincho da Formação de Abadia (GOUVEIA, 2013).

Através da comparação visual entre o ortomosaico resultante do levantamento realizado no dia 14 desse mês e o proveniente do Programa COSMO, de 23 de julho de 2018, constatamos que essa ocorrência não teve significância no recuo da crista da arriba (FIGURA 61). Ainda assim, é de notar a proximidade da mesma ao muro (entre 15 e 20 centímetros) e a influência que processos como a sobrecarga da arriba, a erosão biofísica e o escoamento poderão ter na estabilidade da arriba e na aceleração desse recuo.

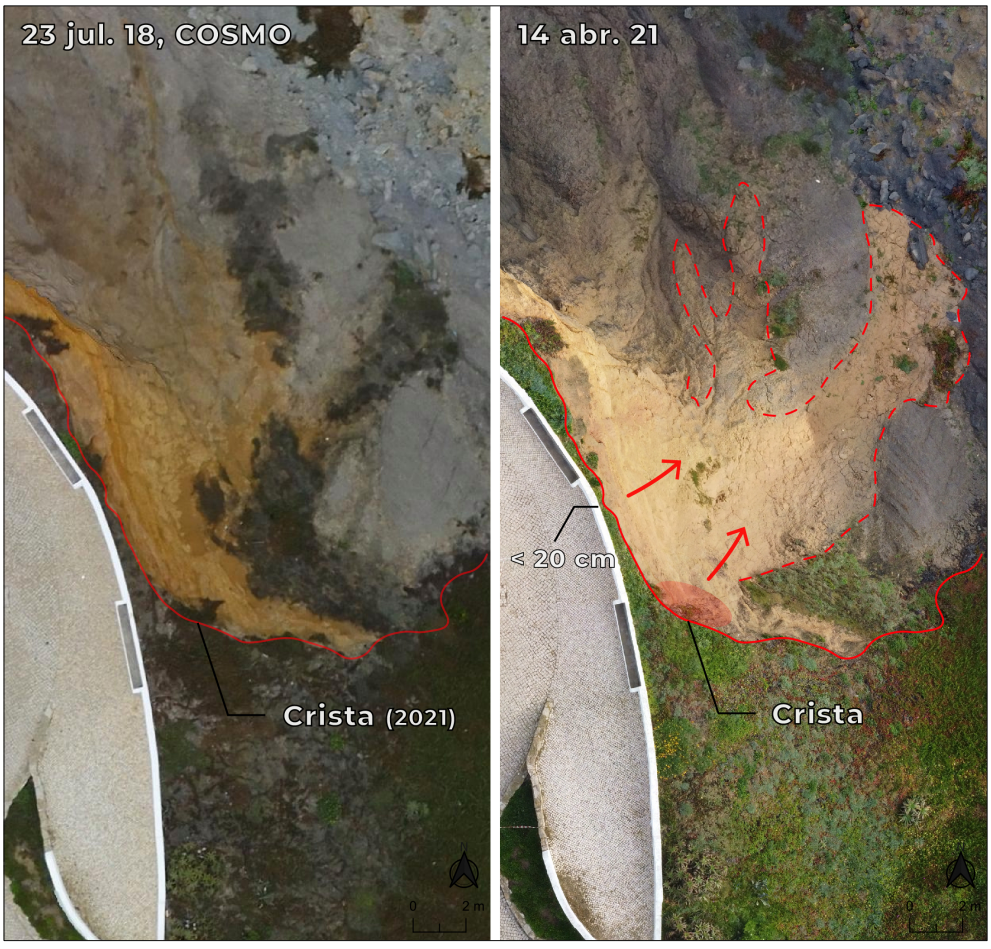



Figura 61 – Comparação visual entre ortomosaicos.
Miradouro da Formosa.

### f) Acesso a Porto Barril

A FIGURA 62 demonstra o exemplo de uma queda de terras e de detritos numa arriba mergulhante (SUNAMURA, 1992), noticiada a 28 de abril de 2021, junto a uma estrada de acesso ao estacionamento da Praia de Porto Barril, no limite sul do concelho. À data do levantamento realizado, 3 de maio de 2021, a crista desse pequeno troço já se encontrava precisamente no rebordo da estrada, sendo ainda possível identificar uma porção de terra instável num segundo patamar. Na mesma figura, a ca. de 20 metros da ocorrência referida, encontra-se um deslizamento translacional ocorrido no mesmo período, tendo a crista recuado até ao rebordo da estrada e os detritos atingido o parque de estacionamento.

Podemos indicar a ondulação como fator preparatório, mas não desencadeante, devido à ação contínua do mar e, nomeadamente devido à ocorrência de ondas de 7 metros (altura máxima) no dia 24 de abril e inferior a 2 metros (altura significativa) entre os dias 26 e 28. Como gerador de instabilidade, sendo um fator preparatório e também, possivelmente, desencadeante, nomeamos a precipitação, devido à saturação do solo e escoamento subterrâneo (precipitação acumulada de 9,4 mm no dia 23, de 3 mm no dia 25, de 5,6 mm no dia 26 e de 1,27 mm no dia 28 de abril).




Figura 62 – Processos erosivos junto ao estacionamento de Porto Barril (03/05/21).

Por fotocomparação, entre ortofotos de 2008, 2014 e 2021, verificamos a perda de massa da arriba num troço de 100 metros paralelamente à crista, e o recuo da sua crista em 12,7 metros na área transversal à estrada (FIGURA 63), sugerindo uma taxa de recuo de aproximadamente 1 m/ano.




Figura 63 – Recuo da arriba na estrada de acesso a Porto Barril.

## 3.4. 2.5D *Change Detection* (*DoD*)

### a) Praia da Mexilhoeira

Na FIGURA 64, que representa a evolução da área da Praia da Mexilhoeira entre 1 de novembro e 27 de dezembro de 2020, verificamos: *i)* junto do topo a queda de detritos com origem numa face côncava que levou à alteração da disposição de detritos pré-existentes sobre o bloco de grandes dimensões, depositando-se num patamar inferior; *ii)* a queda de detritos e respetiva deposição junto à base; *iii)* a remoção de detritos na base; *iv)* a acumulação de sedimentos. Durante este período foram registados vários episódios de precipitação acumulada entre 10 e 20 mm, vento superior a 50 km/h e ondulação superior a 6 metros.

As condições meteorológicas e de ondulação, no dia 4 de dezembro, terão sido fundamentais para estas alterações na medida em que culminou nos valores elevados quanto à velocidade do vento (61,2 km/h) e à ondulação (14 metros), tendo o valor da precipitação acumulada sido 11 mm.

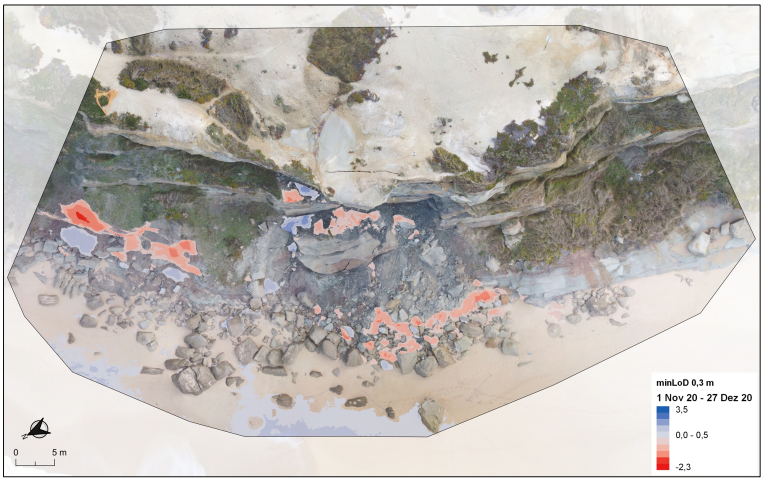



Figura 64 – Diferenças verificadas na Praia da Mexilhoeira entre 01/11/20 e 27/12/20.

Na FIGURA 65 destaca-se a alteração de maior significância nesta área, correspondente à queda do bloco de 127 $m^3$ e a respetiva deposição. Salienta-se, ainda, a perda de detritos junto à base decorrentes do período de tempo anterior (FIGURA 64), bem como de areia de praia (em parte desta área) sendo que, a sul, o perfil da praia elevou ligeiramente.

A amplitude térmica na ordem dos 10°C poderá ter contribuído para a dilatação da fenda do bloco que caiu, considerando ainda os valores perto de 0°C no início de janeiro de 2021, que podem contribuir para o congelamento de água e/ou humidade na fenda.

A precipitação não terá tido um efeito consequente, mas apenas preparatório, apresentando valores de acumulação inferiores a 10 mm. Quanto ao vento, foram registados alguns episódios de velocidade superior a 50 km/h, com rajadas a atingir 80 km/h no dia 22 de janeiro. Já a ondulação, superior a 9 metros, terá contribuído para a remoção da areia e de detritos.

Na FIGURA 66 podemos identificar uma queda de terras e respetiva deposição na face da arriba, bem como a movimentação de detritos, tanto sobre o bloco de grandes dimensões como na base, possivelmente devido à ocorrência de precipitação excecional no dia 20 de fevereiro que, por escoamento superficial, terá deslocado as rochas. Na mesma imagem destaca-se, ainda, a deposição de areia pela ação de ondas de 8 metros que elevou o perfil de praia em 1,5 a 2 metros em apenas 9 dias.

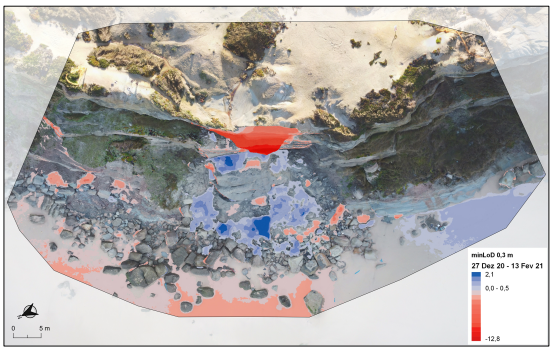



Figura 65 – Diferenças verificadas na Praia da Mexilhoeira entre 27/12/20 e 13/02/21.

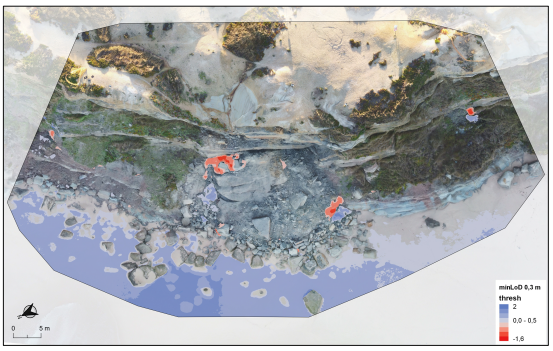



Figura 66 – Diferenças verificadas na Praia da Mexilhoeira entre 13/02/21 e 22/02/21.

A FIGURA 67 demonstra, essencialmente, a dinâmica costeira através da remoção de sedimentos em aproximadamente 1,9 m de altura que, a partir da FIGURA 68, terão sido repostos em menos de 20 dias (+1,8 m) sob a ação do mar, cuja altura significativa variou entre os 5 e os 8 metros no primeiro período e inferior a 2 metros durante o segundo.

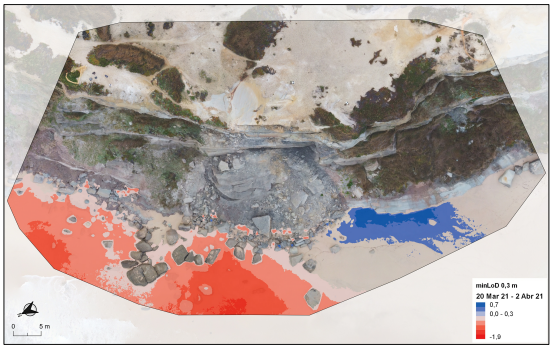


Figura 67 – Diferenças verificadas na Praia da Mexilhoeira entre 20/03/21 e 02/04/21.

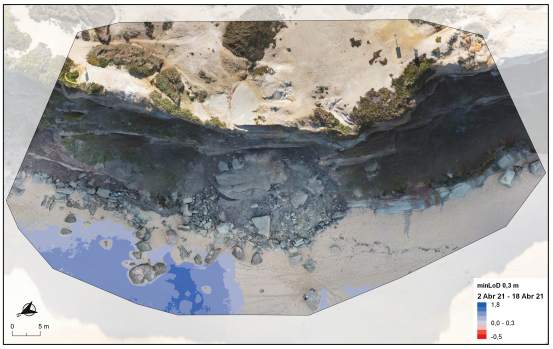


Figura 68 – Diferenças verificadas na Praia da Mexilhoeira entre 02/04/21 e 18/04/21.

Por fim, a FIGURA 69 culmina nas alterações verificadas entre o dia 1 de novembro de 2020 e 18 de abril de 2021, destacando-se a queda de blocos, de detritos, a sua deposição e o aumento do perfil de praia.

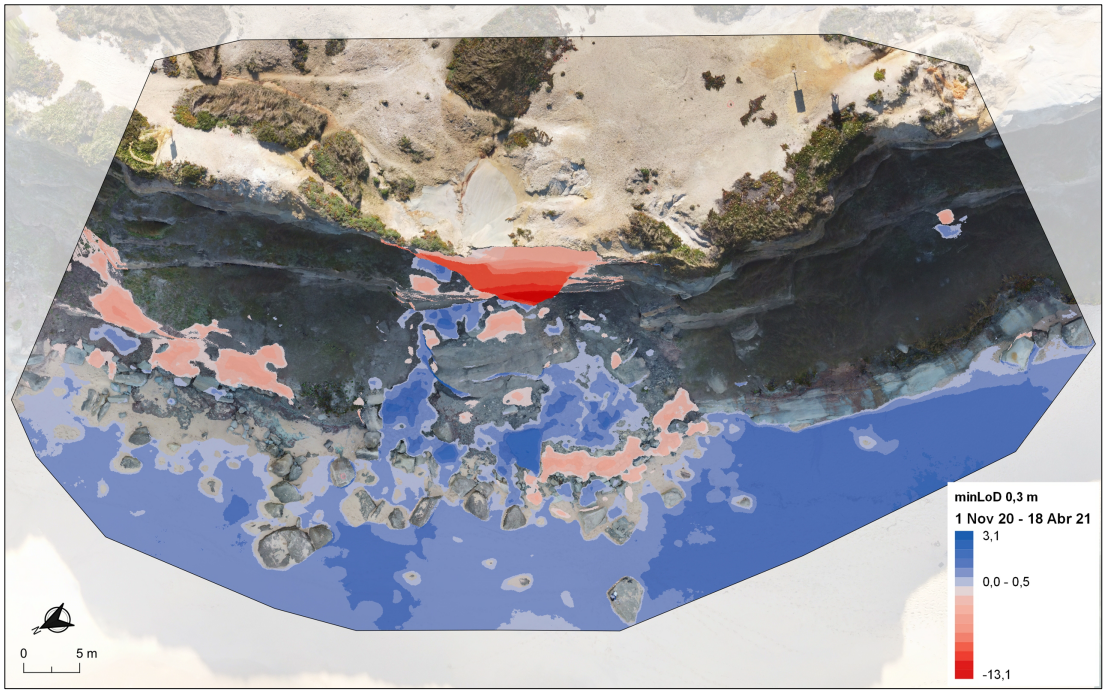



Figura 69 – Diferenças verificadas na Praia da Mexilhoeira entre 01/11/20 e 18/04/21.

### b) Praia da Vigia

A Praia da Vigia revelou-se a de menor dinâmica erosiva face às restantes áreas de monitorização. Ainda assim, foi registada a queda de um bloco de cerca de 33 $m^3$ e a deposição dos seus detritos (FIGURA 70) (devido à possível influência do vento, entre 17 de dezembro de 2020 e 13 de fevereiro de 2021), bem como pequenos blocos que ruíram ou outros de menor dimensão que se movimentaram, entre 13 e 22 de fevereiro, através de escoamento (FIGURA 71), face à precipitação intensa ocorrida nesse período.

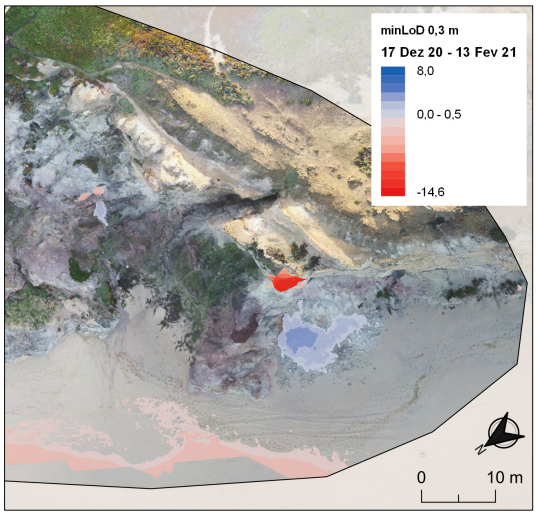



Figura 70 – Diferenças verificadas na Praia da Vigia entre 17/12/20 e 13/02/21.

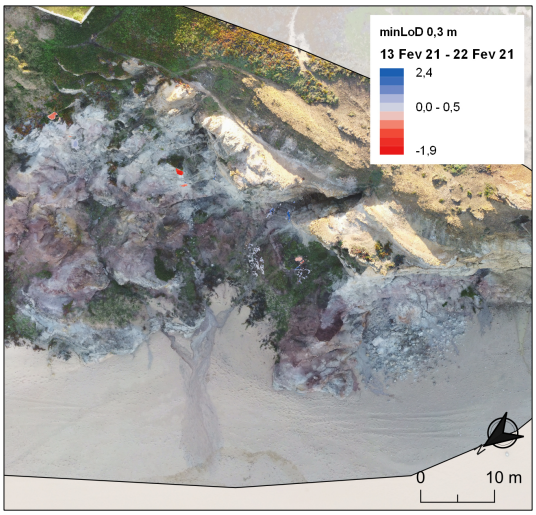



Figura 71 – Diferenças verificadas na Praia da Vigia entre 13/02/21 e 22/02/21.

A FIGURA 72 representa as alterações ocorridas na superfície durante o período de monitorização desta área, 17 de dezembro de 2020 a 18 de abril de 2021. Além dos movimentos anteriormente referidos, podemos ainda apontar a alteração na vegetação (a azul no centro da área), a movimentação de materiais por ravinamento e a diminuição do perfil da areia na foz do ribeiro canalizado.

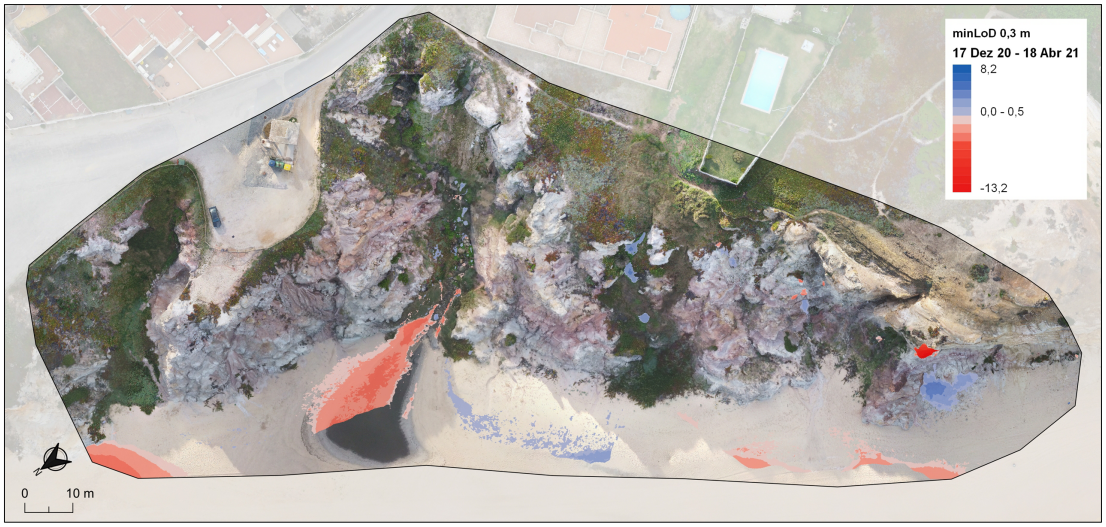



Figura 72 – Diferenças verificadas na Praia da Vigia entre 17/12/20 e 18/04/21.

Comparando com o modelo digital do Programa COSMO (FIGURA 73), verifica-se um maior número de alterações desde 23 de julho de 2018, nomeadamente quanto ao volume de sedimentos na praia, a influência dos ravinamentos, a queda de detritos na parte norte da área de estudo e na fenda junto ao bloco caído recentemente (que poderá, também, dever-se a diferenças entre os MDS).

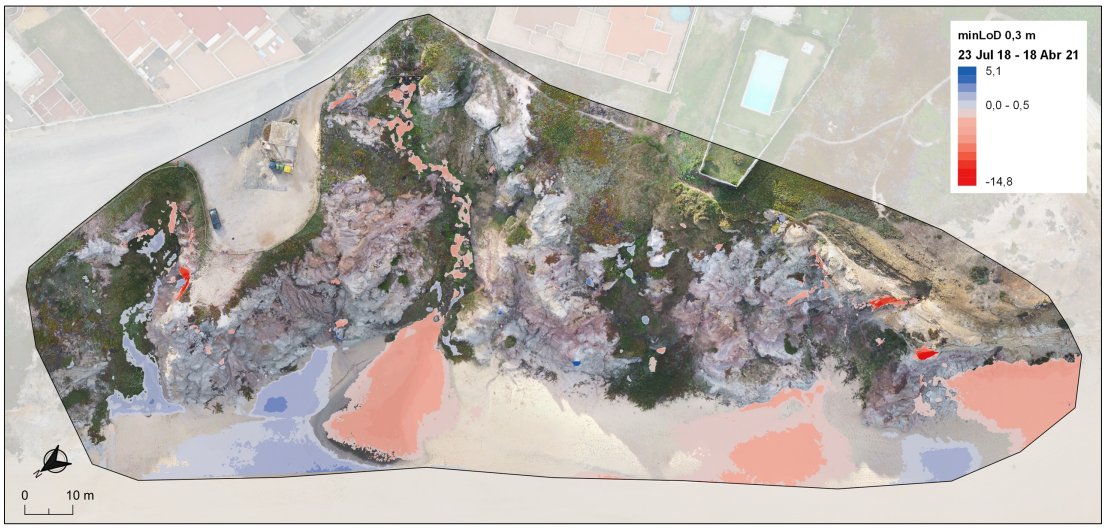



Figura 73 – Diferenças verificadas na Praia da Vigia entre 23/07/18 (COSMO) e 18/04/21.

### c) Porto de Pesca da Assenta

Esta área começou a ser monitorizada após a ocorrência de precipitação acumulada de 62 mm no dia 20 de fevereiro, que terá sido o fator preparatório e desencadeante de uma queda de terras e de detritos que fez recuar o quintal de uma moradia, e de um deslizamento que empurrou um muro de sustentação para a via.

Na FIGURA 74 identificamos a queda de detritos que se depositaram na face da arriba, bem como da remoção pelo mar de blocos pré-existentes na base da mesma, apesar da deposição de areia. Identificamos, ainda, a remoção (pelos serviços municipais) do depósito relativo ao movimento junto à casa ocorrido a 20 de fevereiro e que, ao compararmos com a FIGURA 75, verificamos a ocorrência de um novo recuo que resultou num novo depósito e que, por termos presenciado, podemos confirmar ter ocorrido no dia 26 de abril de 2021 face à precipitação intensa registada nessa data. Na mesma imagem, apontamos ainda um pequeno movimento de detritos na face e a remoção de sedimentos na base, acumulados durante o período anterior, e uma queda de terras misturada com vegetação.

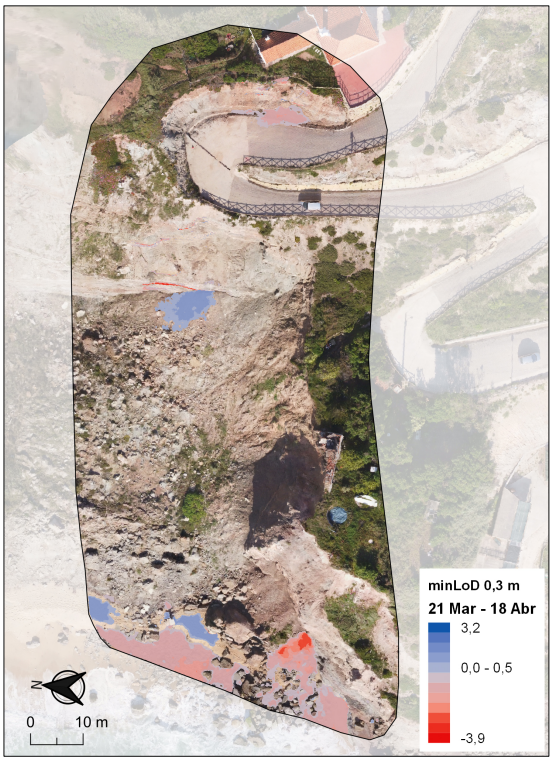



Figura 74 – Diferenças verificadas no Porto da Assenta entre 21/03/21 e 18/04/21.




Figura 75 – Diferenças verificadas no Porto da Assenta entre 18/04/21 e 29/04/21.

A FIGURA 76 compara o levantamento realizado no dia 21 de abril de 2021 com o modelo digital do Programa COSMO, referente a 5 de maio de 2018. É evidente a intensa dinâmica desta área, sobretudo devido à ação do mar e da precipitação, quer devido à saturação do solo quer pelo escoamento superficial que arrasta sedimentos e detritos ao longo das vertentes.

Além das alterações já mencionadas, destaca-se o recuo da crista e face das arribas junto ao mar, gerando a respetiva acumulação; a queda de detritos do parque de estacionamento, na base; um deslizamento de detritos; a ação de desmonte controlado junto ao farol; e ainda alterações nas manchas de vegetação.




Figura 76 – Diferenças verificadas no Porto de Pesca da Assenta entre 05/05/18 (COSMO) e 18/04/21.

## *3.5.* 3D *Change Detection*

Neste ponto pretende-se demonstrar que, a partir das nuvens de pontos geradas através da técnica fotogramétrica utilizada, podem ser facilmente identificadas as áreas onde ocorreu erosão ou deposição, servindo como complemento ou alternativa à comparação *DoD*, dependendo do propósito.

### a) Praia da Mexilhoeira

A FIGURA 77 e FIGURA 78 representam a comparação entre o estado inicial e final da área de monitorização da Praia da Mexilhoeira, durante o período em estudo. A primeira é relativa ao método de comparação C2M, ou seja, entre uma malha (*mesh*) e uma nuvem de pontos, enquanto a segunda compara duas nuvens de pontos através do método M3C2.

Em ambas é possível identificar espacialmente de forma simples onde ocorreram as alterações. No entanto, os valores da distância entre pontos das diferentes nuvens ou entre pontos e a superfície são diferentes e, daí, podemos afirmar através da medição do bloco que caiu durante o intervalo de tempo, que o valor apresentado pelo método M3C2 se aproxima da realidade face ao C2M.

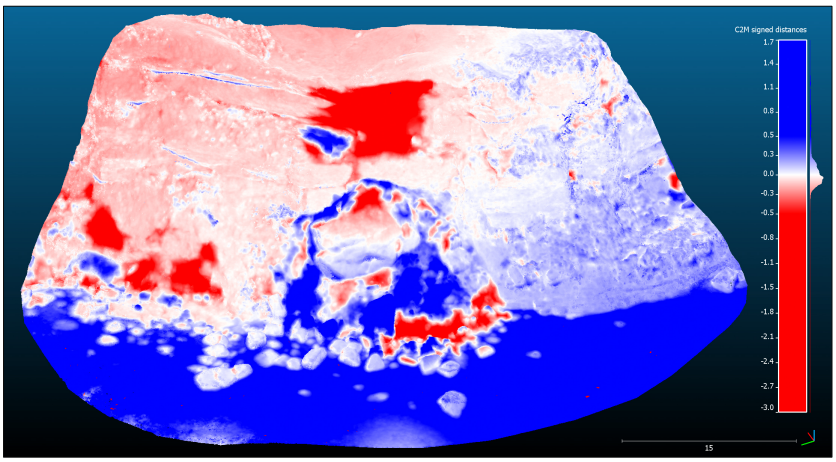



Figura 77 – Diferenças verificadas entre 01/11/20 e 18/04/21 na Praia da Mexilhoeira (C2M).

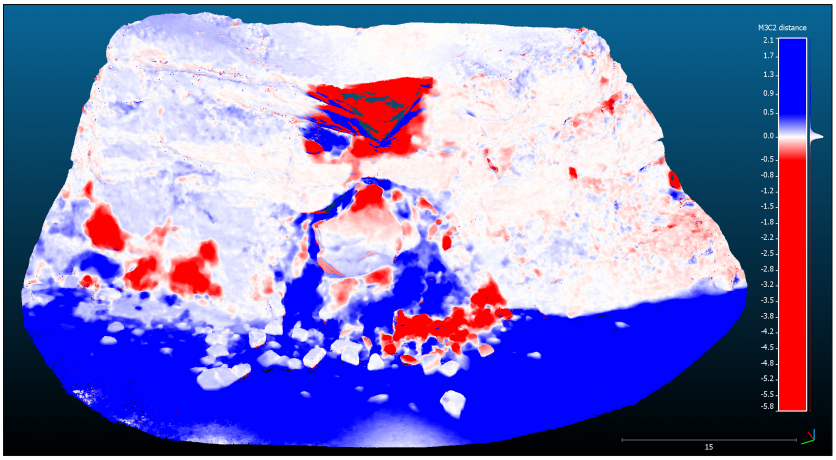



Figura 78 – Diferenças verificadas entre 01/11/20 e 18/04/21 na Praia da Mexilhoeira (M3C2).

No caso da queda de blocos, podemos referir que através do método M3C2, a deteção de alterações inclui na nuvem de pontos gerada o próprio bloco caído, enquanto o C2M faz essa representação no plano de rotura, apesar da superfície de projeção ou referência ser, em ambos os métodos, o modelo inicial.

### b) Praia da Vigia

A FIGURA 79 ilustra a evolução no setor sul da área de monitorização da Praia da Vigia, onde se verificaram as alterações mais relevantes durante este período. Identificamos a queda do bloco de maiores dimensões que também erodiu parte da face da arriba, depositando os seus detritos na base; e outras quedas de menor dimensão, mas que igualmente formaram um depósito no sopé. Podemos ainda indicar as áreas onde, por escoamento, se acumularam sedimentos e outros pequenos detritos.

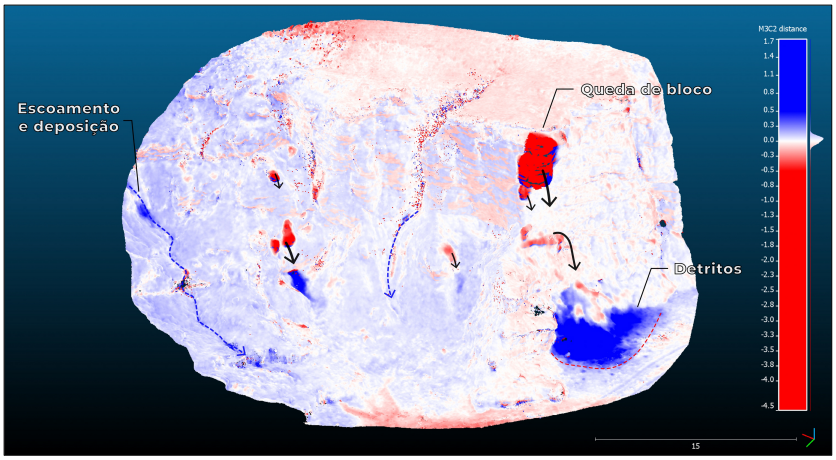



Figura 79 – Diferenças verificadas entre 17/12/20 e 18/04/21 na Praia da Vigia (M3C2).

### c) Porto de Pesca da Assenta

A FIGURA 80 apresenta o resultado da comparação entre nuvens de pontos que nos permite identificar, por exemplo a remoção de materiais na base da arriba por ação do mar, mas também verificar que, em superfícies complexas, como no caso da vegetação, pode ser gerado algum ruído que dificulta a compreensão da imagem.

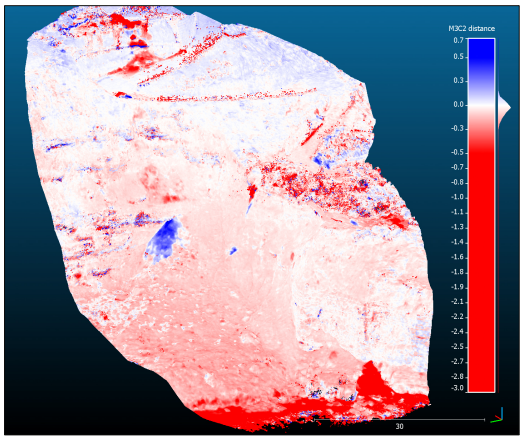



Figura 80 – Diferenças verificadas entre 21/03/21 e 18/04/21 no Porto da Assenta (M3C2).

A FIGURA 81 identifica, sobre a nuvem de pontos com informação RGB, as áreas onde ocorreram movimentos de maior importância: a) queda de detritos do topo e da face da vertente, não sendo representado o seu depósito na base devido à diminuição do seu volume e à limpeza da via entre o intervalo de tempo; b) queda de detritos e formação de depósitos envolvendo, à direita, vegetação; c) deslizamento que empurrou, novamente, o muro de contenção para a via, onde tal já havia ocorrido a 20 de fevereiro.

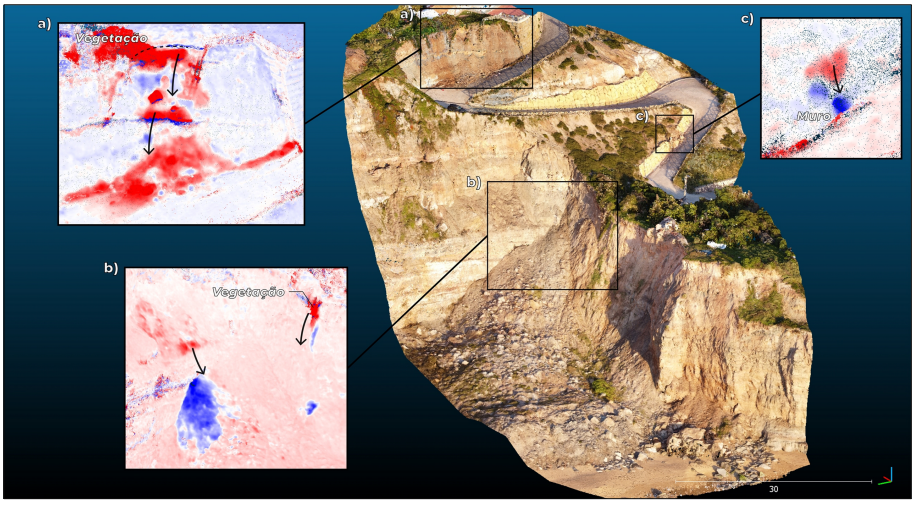



Figura 81 – Interpretação da evolução entre 21/03/21 e 18/04/21, no Porto da Assenta (nuvem de pontos + M3C2).

# Capítulo IV – Proposta metodológica de baixo custo

A partir da metodologia experimental seguida no presente trabalho, detetaram-se alguns pontos fortes e, outros, em parte condicionantes que, apesar de não terem inviabilizado os resultados podem ser aperfeiçoados no futuro. Com base nesta experiência e nos resultados obtidos, propomos uma metodologia de baixo custo, passível de implementação a nível municipal e que permite: *i)* a monitorização de vertentes costeiras; *ii)* a identificação de áreas de risco de movimentos de vertente; *iii)* a obtenção de informação cartográfica regular e de alta resolução; *iv)* a determinação da taxa de recuo das arribas a médio/longo prazo; *v)* contribuir para a identificação de padrões que promovem a erosão costeira.

Antes da implementação de um plano de monitorização, devem ser considerados alguns aspetos relevantes:

- ✓ O UAS deve corresponder às necessidades do plano previsto: por exemplo, ter a possibilidade de pré-programar rotas de voo; ou a resolução do sensor ser adequada à altura do voo, de forma a captar o máximo detalhe, e, em caso negativo, investir em fotografias mais próximas da superfície, compensando a resolução;
- ✓ Estar em conformidade com a lei para a operação de *drones* (necessidade de formação, eventual seguro e pedido prévio de autorização às autoridades competentes para a utilização do espaço aéreo e para a captação de imagens);
- ✓ Delinear o plano em função dos recursos disponíveis: por exemplo, um grande número de fotografias a processar pode exigir uma *workstation* com alta capacidade de processamento;
- ✓ Realizar previamente um voo (manual) de reconhecimento e estudo da área, a fim de refinar o planeamento dos voos e também a definição de GCPs;
- ✓ A definição ou implementação de GCPs fixos e bem definidos (inamovíveis e persistentes) é importante para facilitar o processo manual de marcação nas

imagens e, também, por evitar vários levantamentos topográficos ao longo do acompanhamento da área em estudo.

A metodologia que propomos (FIGURA 82) consiste em três etapas, que se divide em trabalho de gabinete e de campo: plano de monitorização, aquisição de dados, e finalmente no processamento e análise dos dados.

**i. Plano de monitorização**

A aplicação do plano de monitorização deve incidir em áreas de maior risco, ou seja, deverá considerar a suscetibilidade e perigosidade à ocorrência de movimentos de vertente, bem como a exposição de pessoas e bens, traduzindo-se na delimitação de uma área de estudo.

É, ainda, importante identificar o produto a ser extraído a partir da metodologia. Por exemplo, se o pretendido é apenas a obtenção de ortomosaicos e modelos digitais de superfície, deverá ser realizada uma cobertura essencialmente vertical, sem descurar a sobreposição; se as nuvens de pontos tridimensionais forem o objetivo, é fundamental obter fotografias de diferentes perspetivas, assim como uma elevada sobreposição.

O estado do tempo e a sua influência nas condições de luminosidade e na estabilidade do *drone* deve ser tido em conta no planeamento das datas dos voos, sendo preferível evitar dias de vento forte, altos contrastes ou horas de luz solar direta no sensor, e ainda a ocorrência de tempestades geomagnéticas que podem interferir no sistema de posicionamento do *drone*.

Face ao experienciado neste trabalho, acreditamos que o planeamento da rota dos voos possa ser uma mais-valia para a melhoria e consistência dos modelos ao longo do período de monitorização, sobretudo quando é pretendida a comparação 2.5D ou 3D.

O período de monitorização é variado e deve ser definido, quer em função das necessidades, quer em função da evolução da área de estudo pela ocorrência de movimentos de vertente significativos.

### ii. Aquisição de dados

Após a definição do plano de monitorização, a etapa seguinte consiste em trabalho de campo onde, a partir do estudo prévio da área delimitada e do plano de voo, devem ser identificados ou implementados os pontos de controlo (GCPs). São, então, recolhidas as coordenadas exatas com recurso a DGPS (e, se necessário, fazer as devidas correções altimétricas no pós-processamento). Segue-se a execução dos voos (manual ou automatizada) adequada à fisiografia da área de estudo, às condições meteorológicas e ao próprio equipamento utilizado.

Com o intuito de identificar os fatores preparatórios e/ou desencadeantes de eventuais movimentos de vertente, a etapa de *aquisição de dados* engloba, em gabinete, a recolha de dados meteorológicos e oceanográficos.

### iii. Processamento e análise de dados

Novamente em gabinete, a etapa de processamento e análise de dados consiste, em primeiro lugar, num *fluxo de trabalho* da técnica de fotogrametria SfM, que vai gerar o material necessário para proceder à deteção de alterações.

Após a verificação (manual ou automática) da qualidade das fotografias a utilizar, o processamento de dados consiste nos passos já descritos (VER 2.2.2.1) de forma a obter um modelo tridimensional, um MDS e um ortomosaico. Estes resultados primários derivados da técnica SfM-MVS, permitem, já nesta etapa, identificar e interpretar processos erosivos e geomorfológicos nas vertentes.

Depois de exportar os modelos digitais de superfície, as nuvens de pontos e as malhas, são executados os métodos de comparação pretendidos. Antes, deve ser verificado se há um correto alinhamento entre os modelos a comparar e, em caso de erros críticos, proceder à sua correção através de ferramentas (como a georreferenciação no caso dos MDS (se for possível) ou do alinhamento de *point clouds* através da seleção de pontos equivalentes nas diferentes nuvens). Em último recurso, sugere-se a repetição da etapa do processamento, após a identificação e resolução do problema.

Dependendo dos métodos pretendidos, propomos a definição de um *minimum level of detection threshold* ($_{min}$LoD) quanto à comparação DoD (2.5D), considerando um menor valor de deteção face à maior precisão dos modelos. No caso da comparação 3D, deverão ser utilizados os métodos C2M ou M3C2, considerando a acessibilidade em gerar e interpretar o primeiro, e o maior nível de precisão do segundo método.

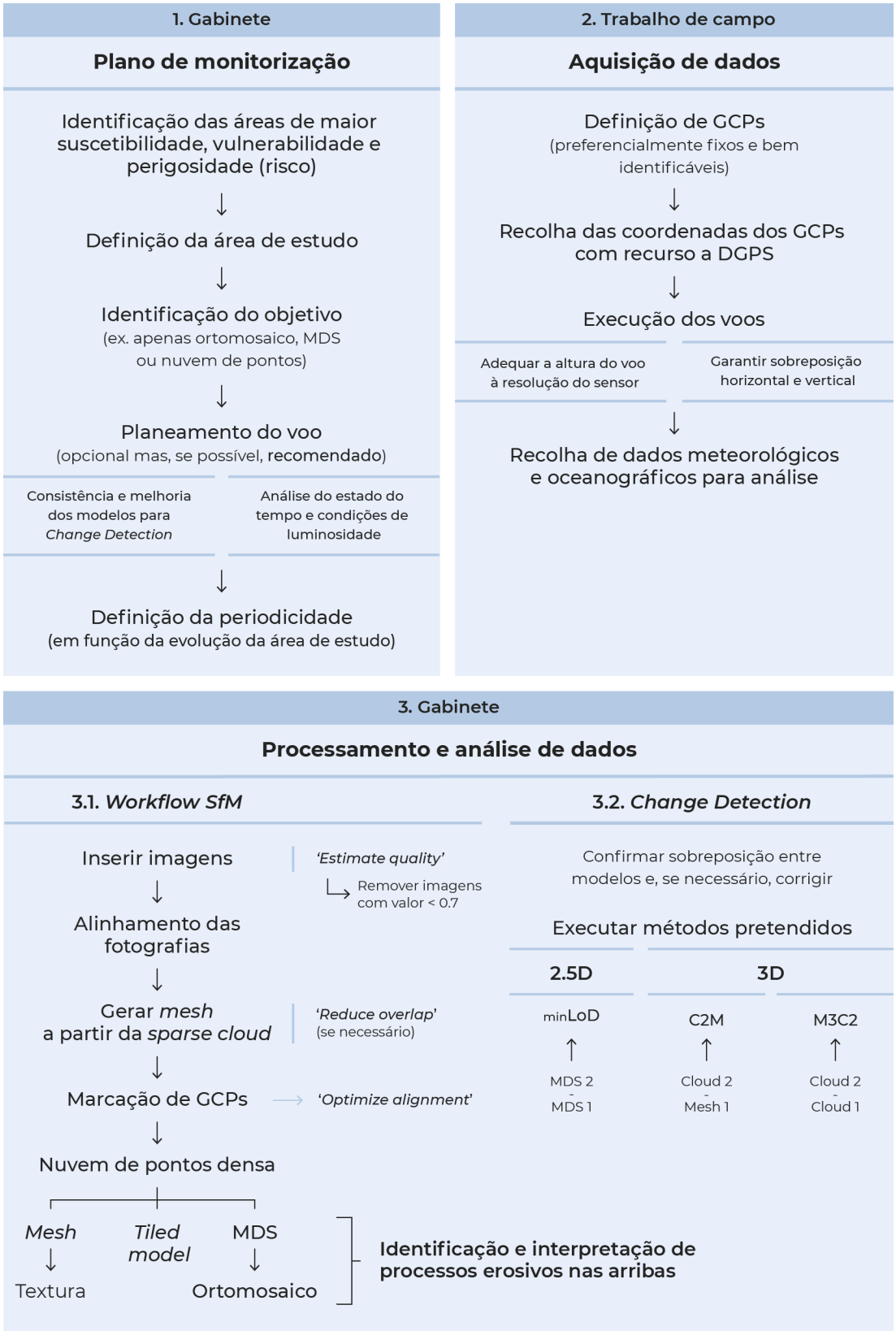



Figura 82 – Proposta metodológica para monitorização de arribas potencialmente instáveis.

# Capítulo V – Considerações finais

Considerando a pressão demográfica no litoral, a instabilidade de vertentes costeiras representa um elevado risco e perigo, tanto para o lado de terra como para o lado do mar. Importa, no entanto, referir que os movimentos de vertente em arribas por si só, ou seja, sem elementos expostos, não provocam vítimas nem prejuízos. Por isso, é essencial consciencializar as pessoas do risco que podem incorrer quando estão próximas destas áreas. O mesmo se aplica a quem planeia e ordena o território, na medida em que a prevenção deve ser o mote de partida para a mitigação da vulnerabilidade. Para tal, é de extrema importância a adoção de políticas sérias de monitorização do litoral, sobretudo em áreas críticas de instabilidade potencial nas arribas.

Quedas de pequenos detritos, abertura e alargamento de fendas no solo e rochas ou a inclinação de árvores ou de objetos, são sinais que, habitualmente, precedem movimentos de vertente (CLAGUE, 2013). Por isso, a observação e monitorização das arribas pode resultar num aviso antecipado de um desmoronamento/movimento que irá ocorrer.

Os UAS enquanto meio de deteção remota têm vindo, na última década, a servir vários ramos de investigação, revelando-se uma ferramenta altamente competitiva face aos meios tradicionais. A acessibilidade na sua aquisição, flexibilidade de atuação em vários cenários, prontidão e precisão, tornam os *drones* um recurso confiável na obtenção de dados à distância e em segurança e, especificamente, em trabalhos de monitorização e inspeção de eventos, objetos e superfícies.

O *drone* utilizado neste trabalho, apesar da sua dimensão reduzida e baixo custo, mostrou-se capaz de recolher os dados necessários para esta investigação. Contudo, apresenta algumas limitações a considerar em trabalhos futuros, como a resistência ao vento (persistente no litoral), o alcance por vezes limitado que pode conduzir à perda de conexão, a incapacidade de planear voos, ou a captação de fotografias somente em formato JPEG (sendo que a possibilidade de captar em formato RAW poderia, por

exemplo, permitir a recuperação de algumas fotografias sobre-expostas ou sub-expostas).

Também a técnica fotogramétrica utilizada demonstra grande utilidade e capacidade de provir material de alta resolução e de precisão decimétrica, **aplicável no âmbito da prevenção de riscos e de ordenamento do território**, com a vantagem de exigir apenas conhecimento básico da técnica e compreensão dos *softwares* para a sua operação.

Este relatório foca-se em vertentes costeiras, mas a metodologia semelhantes pode ser aplicada noutros domínios e ambientes, como na generalidade dos taludes, monitorização de dunas, de obras de defesa costeira, avaliação do risco de cheias e inundações, incêndios, ou em infraestruturas (edifícios, pontes, aerogeradores, proteção de caminhos-de-ferro, entre outras).

Neste trabalho, se as áreas de estudo tivessem maior dimensão, eventualmente não seria possível gerar nuvens de pontos e malhas de alta qualidade pela necessidade de maior processamento a que o *hardware* utilizado não corresponde. Durante uma experiência numa área de 15 hectares, após gerar *high quality point clouds*, de aproximadamente 70 milhões de pontos em ca. de 10 horas, foi possível aferir a limitação do *hardware* no processamento da construção da malha, devido ao *crash* do *software*, o que levou à execução da nuvem de pontos e da malha em qualidade média.

A aplicação da metodologia aqui proposta combina a fotogrametria digital com a utilização de veículos aéreos não tripulados, da qual resulta uma série de produtos que permitem: *i)* a atualização da cartografia municipal; *ii)* auxiliar com maior rigor a delimitação de faixas de proteção; *iii)* a interpretação de processos erosivos; *iv)* a inspeção de taludes, de forma a apurar a existência de sinais de instabilidade; *v)* a deteção de alterações; *vi)* a determinação de padrões, cálculos de áreas, volumes e da taxa de recuo das arribas.

Para obter cartografia precisa e rigorosa, aconselha-se seguir a proposta mencionada. Contudo, se uma precisão decimétrica não for desejada, mas o resultado pretendido for somente numa ótica indicativa e para visualização, poderão ser facilmente construídos

modelos digitais e tridimensionais sem a marcação de GCPs, apenas recorrendo à localização incorporada nos metadados das fotografias captadas pelo *drone*. Se o pretendido for uma precisão intermédia, entre 5 e 15 metros, é possível gerar modelos georreferenciados através do levantamento de coordenadas (dos GCPs) com recurso a um *smartphone* ou, em gabinete, através da identificação de pontos comuns entre os levantamentos aéreos realizados e, por exemplo, imagens de satélite ou fotografias aéreas georreferenciadas e a respetiva extração das coordenadas (<1m).

Através dos resultados obtidos, evidenciamos que a metodologia proposta, quando aplicada em áreas de maior risco, é de extrema importância e poderá contribuir para a mitigação da vulnerabilidade dos elementos expostos.

No caso específico da Praia da Mexilhoeira, cremos que a monitorização prévia desse local poderia ter detetado eventuais sinais de instabilidade em agosto de 2020, à semelhança da fenda testemunhada no presente trabalho. Dessa forma, em plena época balnear, seria possível tomar medidas preventivas diretas (como o desmonte controlado) ou indiretas (como a dissuasão de veraneantes dessa área), em prol da segurança de bens e pessoas.

Além da importância desta metodologia a nível municipal, acreditamos na articulação que a mesma pode ter num quadro de âmbito nacional e regional. A mesma, permitiria identificar áreas de instabilidade potencial (AIP) [4] pelos próprios municípios, complementando as que são delimitadas nos POC (por exemplo, nenhum trecho da Praia da Mexilhoeira/Seixo é considerado AIP, no entanto trata-se de uma área que apresenta muita dinâmica e é suscetível à ocorrência de movimentos de vertente). Poderia, ainda, contribuir para o crescimento e otimização de bases de dados de movimentos de vertente.

[4]AIP: "*Correspondem às áreas constituídas por planos de vertente em domínio costeiro, cuja evolução não resulta diretamente da ação erosiva das ondas no sopé. Inserem-se nestas áreas quaisquer vertentes naturais ou artificiais (taludes de aterro e taludes de escavação) com potencial de instabilidade e suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa de vertente*" (APA, 2018).

## Referências Bibliográficas


Agisoft. (2020). Agisoft Metashape User Manual. In *Agisoft Metashape* (Issue September). https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf

Agisoft LLC. (2021). *Agisoft*. Discover Intelligent Photogrammetry with Metashape. https://www.agisoft.com/

ANPC. (2010). Riscos Costeiros – Estratégias de prevenção, mitigação e protecção, no âmbito do planeamento de emergência e do ordenamento do território. *Cadernos Técnicos PROCIV*, *15*. http://www.prociv.pt/bk/EDICOES/CADERNOSTECNICOS/Documents/CTP15_www.pdf

APA. (2018). Diretivas. In *Programa da Orla Costeira Alcobaça-Cabo Espichel*.

Araújo, M. da A. (2006). Ondas. In *Programa de Geomorfologia Litoral*. http://web.letras.up.pt/asaraujo/Trabalhos/46 Prog.Geom.Litoral.pdf

Barba, S., Barbarella, M., Di Benedetto, A., Fiani, M., Gujski, L., & Limongiello, M. (2019). Accuracy assessment of 3d photogrammetric models from an unmanned aerial vehicle. *Drones*, *3*(4), 1–19. https://doi.org/10.3390/drones3040079

Barnhart, T. B., & Crosby, B. T. (2013). Comparing two methods of surface change detection on an evolving thermokarst using high-temporal-frequency terrestrial laser scanning, Selawik River, Alaska. *Remote Sensing*, *5*(6), 2813–2837. https://doi.org/10.3390/rs5062813

Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P. J., Suárez, L., & Fereres, E. (2009). Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *47*(3), 722–738. https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010457

Bird, E. C. F. (2008). *Coastal Geomorphology: An Introduction* (2nd ed.). Wiley.

Bird, E. C. F. (2016). *Coastal Cliffs: Morphology and Management*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29084-3

Boufama, B., Mohr, R., & Veillon, F. (1993). Euclidean constraints for uncalibrated reconstruction. *1993 IEEE 4th International Conference on Computer Vision*, 466–470. https://doi.org/10.1109/iccv.1993.378179

Buffon, E., da Paz, O., & Sampaio, T. (2018). Veículo aéreo não tripulado (VANT) - aplicação na análise de inundações em áreas urbanas. *GOT - Journal of Geography and Spatial Planning*, *13*(13), 85–108. https://doi.org/10.17127/got/2018.13.004

Castelle, B., Bujan, S., Ferreira, S., & Dodet, G. (2017). Foredune morphological changes and beach recovery from the extreme 2013/2014 winter at a high-energy sandy coast. *Marine Geology*, *385*, 41–55. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.12.006

Clague, J. J. (2013). Landslide. In P. T. Bobrowsky (Ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards* (pp. 594–602). Springer.

Clague, J. J., & Roberts, N. J. (2012). Landslide hazard and risk. In *Landslides: Types, Mechanisms and Modeling* (pp. 1–9). Cambridge University Press.

Clayton, K., & Shamoon, N. (1998). A new approach to the relief of Great Britain II. A classification of rocks based on relative resistance to denudation. *Geomorphology*, *25*(3–4), 155–171. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00038-5

Cook, K. L. (2017). An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. *Geomorphology*, *278*, 195–208. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.009

Cornforth, D. H. (2005). *Landslides in Practice: Investigation, Analysis and Remedial/Preventative Options in Soils*. Wiley. https://doi.org/10.2113/12.1.81

Costa, F. (2012). *Instabilidade em Arribas Costeiras* [Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. http://hdl.handle.net/10216/68122

Cramer, M., Bovet, S., Gültlinger, M., Honkavaara, E., McGill, A., Rijsdijk, M., Tabor, M., & Tournadre, V. (2013). on the Use of Rpas in National Mapping – the Eurosdr Point of View. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XL-1/W2*(September), 93–99. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-1-w2-93-2013

Crawford, A. J., Mueller, D., & Joyal, G. (2018). Surveying Drifting Icebergs and Ice Islands : Deterioration Detection and Mass Estimation with Aerial Photogrammetry and Laser Scanning. *Remote Sensing*, *10*(575). https://doi.org/10.3390/rs10040575

Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, *43*, 27–29. https://doi.org/10.1007/bf02590167

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide Types and Processes. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation (Transportation Research Board Special Report 247)* (pp. 36–75).

Decreto-Lei nº. 124/2019, de 28 de agosto do Ministério do Ambiente e Transição Energética, Diário da República: I série, nº. 131 (2019). https://dre.pt/application/conteudo/174777

DJI. (2019). *Mavic Mini, Manual do utilizador, versão 1.0*. https://www.dji.com/pt/mavic-mini

Earlie, C. S., Masselink, G., Russell, P. E., & Shail, R. K. (2015). Application of airborne LiDAR to investigate rates of recession in rocky coast environments. *Journal of Coastal Conservation*, *19*(6), 831–845. https://doi.org/10.1007/s11852-014-0340-1

Emery, K. O., & Kuhn, G. G. (1982). Sea cliffs: their processes, profiles, and classification. *Geological Society of America Bulletin*, *93*(7), 644–654. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1982)93<644:SCTPPA>2.0.CO;2

Emlid. (2021). *Reach RS2*. Multi-Band RTK GNSS Receiver with Centimeter Precision. https://emlid.com/reachrs2/

Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., & Carbonneau, P. E. (2013). Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, *38*(4), 421–430. https://doi.org/10.1002/esp.3366

Förstner, W. (1986). A feature based correspondence algorithm for image matching. *Int. Arch of Photogrammetry*, *26*(3/3), 150–166.

Furukawa, Y., & Ponce, J. (2010). Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *32*(8), 1362–1376. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.161

Gomes, P. (2018). *Monitorização e modelação da morfodinâmica costeira através de veículos aéreos não tripulados (VANT) – O caso das praias de Ofir e Bonança (Esposende, noroeste de Portugal)* [Escola de Ciências da Universidade do Minho]. http://hdl.handle.net/1822/55831

Gómez-Gutiérrez, Á., & Gonçalves, G. R. (2020). Surveying coastal cliffs using two UAV platforms (multirotor and fixed-wing) and three different approaches for the estimation of volumetric changes. In *International Journal of Remote Sensing* (Vol. 41, Issue 21). https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18055.14246

Gómez-Pazo, A., & Pérez-Alberti, A. (2021). *The Use of UAVs for the Characterization and Analysis of Rocky Coasts*.

Gonçalves, D. (2020). *Impact of image acquisition geometry and SfM-MVS processing parameters on the 3D reconstruction of coastal cliffs* [Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra]. http://hdl.handle.net/10316/92198

Gonçalves, J. A., & Henriques, R. (2015). UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *104*, 101–111. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009

Gouveia, L. (2013). *Análise da Susceptibilidade à Ocorrência de Instabilidades nas Arribas do Concelho de Torres Vedras* [Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa]. http://hdl.handle.net/10451/10680

Grenzdörffer, G., Engel, A., Teichert, B., Kumar, G., Madison, W. D. S., Madison, W. D. S., Pearce, M., & Madison, W. D. S. (2008). The Photogrammetric Potential of Low-Cost UAVs in Forestry and Agriculture. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *1*, 1207–1213. http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/206.pdf

GTL. (2014). Gestão da Zona Costeira - O Desafio da Mudança. *Relatório Do Grupo de Trabalho Do Litoral*. https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/GeoDocs/geoportaldocs/docs/Relatorio_Final_GTL2015.pdf

Harris, C., & Stephens, M. (1988). A Combined Corner and Edge Detector. *Alvey Vision Conference*, 147–151. https://doi.org/10.5244/C.2.23

Henriques, R. (2006). *Monitorização da zona costeira tendo em vista a sua vulnerabilidade – aplicação à zona costeira noroeste de Portugal* [Escola de Ciências da Universidade do Minho]. http://hdl.handle.net/1822/42711

Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). The Landslide Handbook - A guide to understanding landslides. In *U.S. Geological Survey Circular* (Issue 1325). https://doi.org/10.3133/cir1325

Horacio, J., Muñoz-Narciso, E., Trenhaile, A. S., & Pérez-Alberti, A. (2019). Remote sensing monitoring of a coastal-valley earthflow in northwestern Galicia, Spain. *Catena*, *178*(November 2018), 276–287. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.028

Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2013). The Varnes classification of landslide types, an update. In *Landslides* (11th ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y

Ierodiaconou, D., Schimel, A. C. G., & Kennedy, D. M. (2016). A new perspective of storm bite on sandy beaches using Unmanned Aerial Vehicles. *Zeitschrift Fur Geomorphologie*, *60*(May), 123–137. https://doi.org/10.1127/zfg_suppl/2016/00247

James, M. R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., & Niethammer, U. (2017). Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, *280*, 51–66. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.021

Jaud, M., Kervot, M., Delacourt, C., & Bertin, S. (2019). Potential of smartphone SfM photogrammetry to measure coastal morphodynamics. *Remote Sensing*, *11*(19). https://doi.org/10.3390/rs11192242

Jaud, M., Letortu, P., Théry, C., Grandjean, P., Costa, S., Maquaire, O., Davidson, R., & Le Dantec, N. (2019). UAV survey of a coastal cliff face – Selection of the best imaging angle. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *139*, 10–20. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.024

Johnson, K., Nissen, E., Saripalli, S., Arrowsmith, J. R., McGarey, P., Scharer, K., Williams, P., & Blisniuk, K. (2014). Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion. *Geosphere*, *10*(5), 969–986. https://doi.org/10.1130/GES01017.1

Korup, O. (2012). Landslides in Earth system. In J. J. Clague & D. Stead (Eds.), *Landslides: Types, Mechanisms and Modeling* (pp. 10–23). Cambridge University Press.

Kuhn, D., & Prüfer, S. (2014). Coastal cliff monitoring and analysis of mass wasting processes with the application of terrestrial laser scanning: A case study of Rügen, Germany. *Geomorphology*, *213*, 153–165. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.005

Kullberg, J. C., Rocha, R. B., Soares, A. F., Rey, J., Terrinha, P., & Callapez, P. (2006). A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. *Geologia de Portugal No Contexto Da Ibéria*, 317–368.

Küng, O., Strecha, C., Beyeler, A., Zufferey, J.-C., Floreano, D., Fua, P., & Gervaix, F. (2012). The Accuracy of Automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-Light UAV Imagery. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XXXVIII-1/*(March 2016), 125–130. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxviii-1-c22-125-2011

Lague, D., Brodu, N., & Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *82*, 10–26. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009

Leitão, M. C. (2013). *Contributos da Geologia Sedimentar para a Valorização do Património Geológico: Aplicação a Afloramentos Jurássicos no Sector Litoral Santa Cruz – Praia da Foz – Cambelas – Assenta (região de Torres Vedras)* [Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa]. http://hdl.handle.net/10451/9417

Letortu, P., Jaud, M., Grandjean, P., Ammann, J., Costa, S., Maquaire, O., Davidson, R., Le Dantec, N., & Delacourt, C. (2018). Examining high-resolution survey methods for monitoring cliff erosion at an operational scale. *GIScience and Remote Sensing*, *55*(4), 457–476. https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1408931

Lucieer, A., Jong, S. M. d., & Turner, D. (2014). Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography*, *38*(1), 97–116. https://doi.org/10.1177/0309133313515293

Marques, F. M. S. F. (2009). Sea cliff instability hazard prevention and planning: Examples of practice in Portugal. *Journal of Coastal Research*, *SPEC. ISSUE 56*, 856–860.

Marques, F. M. S. F., Matildes, R., Redweik, P., Penacho, N., Queiroz, S., Garzón, V., Rosa, M., & Gonçalves, T. (2013). Estudo do litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo - Monitorização da evolução de fachadas de arribas selecionadas: técnicas e resultados (Entregável 1.2.2.1.c). In *Criação e Implementação de um Sistema de Monitorização no Litoral Abrangido pela Área de Jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo*. https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/Geodocs/geoportaldocs/Politicas/Agua/Ordenamento/SistemasMonitorizacaoLitoral/E_1.2.2.1.c_Monitorizaao_arribas.pdf

Marques, F. M. S. F., Penacho, N., Queiroz, S., Gouveia, L., Matildes, R., & Redweik, P. (2013). Estudo do litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo - Definição de um quadro de referência a aplicar em projetos de intervenção nas arribas (Entregável 1.4.1.1.a). In *Criação e Implementação de um Sistema de Monitorização no Litoral Abrangido pela Área de Jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo*. https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/Geodocs/geoportaldocs/Politicas/Agua/Ordenamento/SistemasMonitorizacaoLitoral/E_1.4.1.1.a_Quadro_referencia_arribas.pdf

Masselink, G., Hughes, M. G., & Knight, J. (2014). *Introduction to Coastal Processes & Geomorphology* (2nd ed.). Routledge.

Matildes, R. (2009). *Detecção fotogramétrica de movimentos em arribas costeiras e gestão do inventário num sistema de informação geográfica*. 181.

Matildes, R. (2016). *Técnicas de teledeteção de alta resolução aplicadas à monitorização 3D de arribas litorais: adequabilidade, modelação da informação e resultados* [Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa]. http://hdl.handle.net/10451/25380

Meneses, B. (2011). *Suscetibilidade e Risco de Movimentos de Vertente no Concelho de Tarouca* [Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa]. http://hdl.handle.net/10451/6029

Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2014). Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms*, *40*(4), 473–486. https://doi.org/10.1002/esp.3648

Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. *Geomorphological Techniques (Online Edition)*, *2*. https://hdl.handle.net/2134/17493

Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, *6*(1), 1–15. https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x

Observador. (2018). *Derrocada em praia de Sintra faz um morto e um ferido ligeiro*. https://observador.pt/2018/03/15/derrocada-em-praia-de-sintra-faz-dois-feridos/

Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L. A., & Palomar-Vázquez, J. (2012). Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*, *123*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.024

Penacho, N. (2012). *Caracterização, evolução e análise de suscetibilidade à ocorrência de instabilidades das arribas do arco Baleal - Bom Sucesso (Peniche-Óbidos)* [Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa]. http://hdl.handle.net/10451/8947

Penacho, N., Marques, F. M. S. F., Queiroz, S., Gouveia, L., Matildes, R., Redweik, P., & Garzón, V. (2013). Estudo do litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo - Inventário de instabilidades nas arribas obtido por fotointerpretação (Entregável 1.2.2.1.a). In *Criação e Implementação de um Sistema de Monitorização no Litoral Abrangido pela Área de Jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo*. https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/Geodocs/geoportaldocs/Politicas/Agua/Ordenamento/SistemasMonitorizacaoLitoral/E_1.2.2.1.a_Fotointerpretaao_arribas.pdf%0A

Penacho, N., Pinto, C., Teixeira, S. B., & Marques, F. (2019). Modelo de monitorização costeira no litoral de arriba de portugal continental. *IX Congresso Sobre Planeamento e Gestão Das Zonas Costeiras Dos Países de Expressão Portuguesa*, *Maio*. https://www.researchgate.net/publication/334611837

Pérez-Alberti, A., & Trenhaile, A. S. (2015). Clast mobility within boulder beaches over two winters in Galicia, northwestern Spain. *Geomorphology*, *248*, 411–426. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.08.001

Qin, R., Tian, J., & Reinartz, P. (2016). 3D change detection – Approaches and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *122*, 41–56. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.09.013

Quesada, C., & Oliveira, J. T. (Eds.). (2019). *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach (Volume 3: The Alpine Cycle)* (Vol. 3). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11295-0

Ramos-Pereira, A. (2008). Sistemas litorais: dinânicas e ordenamento. *Finisterra*, *43*(86). https://doi.org/10.18055/finis1385

Rinaudo, F., Chiabrando, F., Lingua, A., & Spanò, A. (2012). Archaeological Site Monitoring: Uav Photogrammetry Can Be an Answer. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XXXIX-B5*(September), 583–588. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxix-b5-583-2012

Rossi, G., Tanteri, L., Tofani, V., Vannocci, P., Moretti, S., & Casagli, N. (2018). Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization. *Landslides*, *15*(5), 1045–1052. https://doi.org/10.1007/s10346-018-0978-0

Rothermel, M., & Wenzel, K. (2012). SURE - Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. *Proceedings LC3D Workshop*, 1–9.

Ružić, I., Marović, I., Benac, Č., & Ilić, S. (2014). Coastal cliff geometry derived from structure-from-motion photogrammetry at Stara Baška, Krk Island, Croatia. *Geo-Marine Letters*, *34*(6). https://doi.org/10.1007/s00367-014-0380-4

Silva, A. (2007). *Geomorfologia e ordenamento do litoral*. *January 2007*, 64. http://webopac.sib.uc.pt/search~S74*por/?searchtype=X&searcharg=geomorfologia+e+ordenamento+do+litoral+António+Silva&searchscope=74&sortdropdown=-&SORT=D&extended=1&SUBMIT=Pesquisar&searchlimits=&searchorigarg=Xgeomorfologia+e+ordenamento+do+litoral

Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, D. J. (2015). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*, *40*(2), 247–275. https://doi.org/10.1177/0309133315615805

Šperl, J., & Trčková, J. (2008). Permeability and porosity of rocks and their relationship based on laboratory testing. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, *5*(1), 41–47.

Spetsakis, M., & Aloimonos, J. Y. (1991). A multi-frame approach to visual motion perception. *International Journal of Computer Vision*, *6*(3), 245–255. https://doi.org/10.1007/BF00115698

Stark, M., Heckmann, T., Piermattei, L., Dremel, F., Kaiser, A., Machowski, P., Haas, F., & Becht, M. (2021). From consumer to enterprise grade: How the choice of four UAS impacts point cloud quality. *Earth Surface Processes and Landforms*, *July 2020*, 1–25. https://doi.org/10.1002/esp.5142

Sunamura, T. (1992). *Geomorphology of Rocky Coasts*. Wiley.

Szeliski, R., & Kang, S. B. (1994). Recovering 3D shape and motion from image streams using nonlinear least squares. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, *5*(1), 10–28. https://doi.org/https://doi.org/10.1006/jvci.1994.1002

Teixeira, J. (2011). *Hidrogeomorfologia e sustentabilidade de recursos hídricos subterrâneos* [Universidade de Aveiro]. http://hdl.handle.net/10773/8308

Teixeira, M. (2005). Movimentos de Vertente: Factores de Ocorrência e Metodologia de Inventariação. *Geonovas*, *19*, 95–106.

Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., & Abellán, A. (2016). Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos. *10º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica, A Coruña, España*, *1*(1), 209–216.

Trenhaile, A. S. (2019). Rock Coast Processes. In C. W. Finkl & C. Makowski (Eds.), *Encyclopedia of Coastal Science* (2nd ed., pp. 1454–1458). Springer.

Turner, I. L., Harley, M. D., & Drummond, C. D. (2016). UAVs for coastal surveying. *Coastal Engineering*, *114*, 19–24. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.03.011

Varnes, D. (1978). Slope Movement Types and Processes. *Special Report*, *176*, 11–33.

Vidal, A. M. F. (2013). *Extração e avaliação de geo-informação pelo uso de imagens adquiridas por veículos aéreos não tripulados* [Faculdade de Ciências da Universidade do Porto]. https://hdl.handle.net/10216/70250

Viles, H. A. (2001). Scale issues in weathering studies. *Geomorphology*, *41*(1), 63–72. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00104-0

Villanueva, J. K. S., & Blanco, A. C. (2019). Optimization of ground control point (GCP) configuration for unmanned aerial vehicle (UAV) survey using structure from motion (SFM). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *42*(4/W12), 167–174. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-167-2019

Westoby, Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, *179*, 300–314. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021

Westoby, M. J., Lim, M., Hogg, M., Pound, M. J., Dunlop, L., & Woodward, J. (2018). Cost-effective erosion monitoring of coastal cliffs. *Coastal Engineering*, *138*(May), 152–164. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.04.008

Wheaton, J. M. (2008). *Uncertainty in Morphological Sediment Budgeting of Rivers* [University of Southampton]. https://sites.google.com/a/joewheaton.org/www/Home/research/projects-1/morphological-sediment-budgeting

Wheaton, J. M., Brasington, J., Darby, S. E., & Sear, D. A. (2009). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, *35*(2), 136–156. https://doi.org/10.1002/esp.1886

Wingtra. (2021). *Drone photogrammetry vs. LIDAR: what sensor to choose for a given application*. https://wingtra.com/drone-photogrammetry-vs-lidar/

Xu, Q., Li, W. le, Ju, Y. zhen, Dong, X. jun, & Peng, D. lei. (2020). Multitemporal UAV-based photogrammetry for landslide detection and monitoring in a large area: a case study in the Heifangtai terrace in the Loess Plateau of China. *Journal of Mountain Science*, *17*(8), 1826–1839. https://doi.org/10.1007/s11629-020-6064-9

Zaragoza, I. M.-E., Caroti, G., Piemonte, A., Riedel, B., Tengen, D., & Niemeier, W. (2017). Structure from motion (SfM) processing of UAV images and combination with terrestrial laser scanning, applied for a 3D-documentation in a hazardous situation. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *8*(2), 1492–1504. https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1345796

Zêzere, J. L. (1997). *Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa*. Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa.

Zêzere, J. L. (2005). *Dinâmica de Vertentes e Riscos Geomorfológicos*.

# Anexos

**Tabela 13 – Dados dos levantamentos aéreos e do processamento fotogramétrico, por área de monitorização.**

| Área | Levantamento | | | | | Nuvem de pontos | | | MDS | Ortomosaico | Ground Control Points (GCP) | | Check points | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | COD | Data | Fotos captadas | Fotos para alinhamento | Área (ha) | Sparse Cloud (*tie points*) | Dense Cloud (pts) | Reprojection error (pix) | Escala (cm/pix) | Escala (cm/pix) | Nº | RMSE (cm) | Nº | RMSE (cm) |
| Mexilhoeira | Mex1 | 24/10/2020 | 97 | 69 | 1,37 | 35 268 | 7 639 848 | 0,968 | 4,00 | 2 | 5 | 14,6262 | 1 | 131,08 |
| | Mex2 | 01/11/2020 | 127 | 114 | 1,04 | 63 204 | 9 438 868 | 1,010 | 4,03 | 2,02 | 7 | 9,61326 | 2 | 16,3689 |
| | Mex3 | 27/12/2020 | 162 | 143 | 1,21 | 60 385 | 13 021 752 | 1,000 | 3,44 | 1,72 | 5 | 11,43140 | 2 | 7,38898 |
| | Mex4 | 13/02/2021 | 356 | 200 | 1,16 | 116 982 | 15 681 272 | 1,130 | 3,36 | 1,68 | 7 | 5,68372 | 2 | 26,4376 |
| | Mex5 | 22/02/2021 | 299 | 250 | 1,3 | 104 087 | 17 451 834 | 1,130 | 3,27 | 1,64 | 7 | 5,92381 | 2 | 11,033 |
| | Mex6 | 07/03/2021 | 494 | 200 | 1 | 113 444 | 17 159 299 | 1,180 | 3,02 | 1,51 | 7 | 17,97960 | 2 | 17,3001 |
| | Mex7 | 20/03/2021 | 517 | 200 | 1,16 | 115 179 | 15 340 842 | 1,000 | 3,00 | 1,5 | 7 | 4,26821 | 2 | 8,99634 |
| | Mex8 | 02/04/2021 | 275 | 200 | 1,1 | 89 065 | 16 747 935 | 1,090 | 3,27 | 1,63 | 7 | 5,84920 | 2 | 13,391 |
| | Mex9 | 18/04/2021 | 406 | 200 | 1,12 | 154 908 | 23 224 509 | 1,120 | 2,66 | 1,33 | 7 | 6,58432 | 3 | 10,7321 |
| Vigia | Vig1 | 17/12/2020 | 124 | 111 | 2,77 | 63 453 | 27 944 566 | 0,795 | 3,09 | 1,55 | 8 | 5,66246 | 3 | 20,0643 |
| | Vig2 | 13/02/2021 | 503 | 300 | 2,72 | 194 898 | 32 183 471 | 0,987 | 3,20 | 1,60 | 11 | 5,52665 | 4 | 19,7686 |
| | Vig3 | 22/02/2021 | 478 | 300 | 3,14 | 184 832 | 32 471 955 | 1,020 | 3,57 | 1,79 | 12 | 5,68910 | 6 | 19,2139 |
| | Vig4 | 07/03/2021 | 614 | 300 | 4,24 | 226 390 | 29 243 678 | 0,981 | 4,10 | 2,05 | 12 | 5,82543 | 5 | 6,23924 |
| | Vig5 | 20/03/2021 | 576 | 250 | 3,72 | 200 702 | 25 539 618 | 0,888 | 4,01 | 2,01 | 11 | 4,70953 | 7 | 14,499 |
| | Vig6 | 02/04/2021 | 432 | 250 | 3,28 | 185 242 | 29 337 796 | 0,861 | 3,70 | 1,85 | 13 | 10,59780 | 7 | 65,0409 |
| | Vig7 | 18/04/2021 | 588 | 250 | 3,36 | 223 476 | 35 307 740 | 0,924 | 3,37 | 1,69 | 13 | 5,95787 | 7 | 16,0228 |
| Assenta | Ass1 | 21/02/2021 | 132 | 115 | 0,33 | 65 771 | 17 234 971 | 0,762 | 1,38 | 0,689 | 4 | 3,85677 | 1 | 23,9114 |
| | Ass2 | 28/02/2021 | 354 | 306 | 1,65 | 159 335 | 50 859 907 | 0,940 | 2,19 | 1,1 | 4 | 5,07861 | 1 | 13,521 |
| | Ass3 | 21/03/2021 | 659 | 250 | 2,16 | 208 293 | 34 591 140 | 0,878 | 3,21 | 1,61 | 4 | 3,21335 | 2 | 6,39262 |
| | Ass4 | 02/04/2021 | 513 | 350 | 7,92 | 198 409 | 40 721 742 | 1,010 | 5,41 | 2,71 | 8 | 4,85535 | 3 | 10,2341 |
| | Ass5 | 18/04/2021 | 497 | 351 | 11,11 | 207 816 | 46 559 417 | 0,861 | 5,42 | 2,71 | 9 | 6,73181 | 3 | 9,30645 |
| | Ass6 | 29/04/2021 | 486 | 350 | 7,63 | 207 657 | 58 147 917 | 0,858 | 4,48 | 2 | 10 | 4,76109 | 4 | 37,0767 |

**Tabela 14 – Coordenadas dos GCPs na área da Praia da Mexilhoeira.**

| Praia da Mexilhoeira | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Name** | **Easting** | **Northing** | **Elevation** | **Easting RMS** | **Northing RMS** | **Elevation RMS** | **Lateral RMS** |
| GCP1 | -106688,536 | -56030,252 | 33,029 | 0,012 | 0,013 | 0,015 | 0,018 |
| GCP2 | -106681,224 | -56041,406 | 33,684 | 0,011 | 0,01 | 0,015 | 0,015 |
| GCP3 | -106695,473 | -56060,097 | 32,958 | 0,01 | 0,01 | 0,019 | 0,014 |
| GCP4 | -106705,545 | -56071,514 | 32,518 | 0,013 | 0,011 | 0,016 | 0,017 |
| GCP5 | -106709,062 | -56061,688 | 32,396 | 0,011 | 0,01 | 0,021 | 0,015 |
| GCP6 | -106735,724 | -56087,009 | 5,158 | 0,011 | 0,014 | 0,026 | 0,018 |
| GCP7 | -106730,593 | -56060,805 | 5,449 | 0,012 | 0,012 | 0,022 | 0,017 |
| GCP8 | -106720,205 | -56025,833 | 5 | 0,01 | 0,01 | 0,021 | 0,015 |
| GCP9 | -106698,9 | -56002,462 | 4,916 | 0,016 | 0,011 | 0,029 | 0,02 |
| GCP10 | -106722,808 | -56019,071 | 3,566 | 0,016 | 0,01 | 0,026 | 0,019 |

**Tabela 15 – Coordenadas dos GCPs na área da Praia da Vigia.**

| Praia da Vigia | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Name** | **Easting** | **Northing** | **Elevation** | **Easting RMS** | **Northing RMS** | **Elevation RMS** | **Lateral RMS** |
| GCP1 | -107103,6 | -57074,986 | 23,471 | 0,01 | 0,011 | 0,016 | 0,015 |
| GCP2 | -107126,53 | -57084,183 | 23,443 | 0,01 | 0,01 | 0,015 | 0,015 |
| GCP3 | -107130,7 | -57094,532 | 23,897 | 0,011 | 0,011 | 0,015 | 0,015 |
| GCP4 | -107106,8 | -57116,526 | 25,402 | 0,01 | 0,01 | 0,018 | 0,014 |
| GCP5 | -107116,21 | -57109,673 | 24,692 | 0,011 | 0,011 | 0,018 | 0,016 |
| GCP6 | -107120,56 | -57113,958 | 24,662 | 0,011 | 0,013 | 0,018 | 0,017 |
| GCP7 | -107109,31 | -57142,308 | 27,255 | 0,01 | 0,01 | 0,018 | 0,015 |
| GCP8 | -107130,49 | -57162,747 | 27,937 | 0,01 | 0,011 | 0,019 | 0,015 |
| GCP9 | -107151,7 | -57156,729 | 26,086 | 0,011 | 0,01 | 0,019 | 0,015 |
| GCP10 | -107174,87 | -57188,69 | 28,884 | 0,011 | 0,011 | 0,02 | 0,015 |
| GCP11 | -107181,6 | -57189,442 | 28,876 | 0,013 | 0,011 | 0,019 | 0,017 |
| GCP12 | -107219,83 | -57201,521 | 30,773 | 0,012 | 0,01 | 0,018 | 0,016 |
| GCP13 | -107226,63 | -57222,223 | 33,757 | 0,01 | 0,011 | 0,017 | 0,015 |
| GCP14 | -107214,99 | -57217,781 | 32,942 | 0,015 | 0,012 | 0,017 | 0,019 |
| GCP15 | -107239,41 | -57220,258 | 8,052 | 0,013 | 0,016 | 0,027 | 0,02 |
| GCP16 | -107211,38 | -57166,923 | 9,224 | 0,012 | 0,01 | 0,015 | 0,016 |
| GCP17 | -107188,32 | -57141,862 | 7,069 | 0,045 | 0,029 | 0,021 | 0,054 |
| GCP18 | -107173,97 | -57124,804 | 6,734 | 0,011 | 0,01 | 0,02 | 0,015 |
| GCP19 | -107147,43 | -57074,249 | 7,045 | 0,01 | 0,01 | 0,019 | 0,014 |
| GCP20 | -107140,21 | -57041,576 | 7,594 | 0,011 | 0,011 | 0,017 | 0,016 |

**Tabela 16 – Coordenadas dos GCPs na área do Porto de Pesca da Assenta.**

| Porto de Pesca da Assenta | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Name** | **Easting** | **Northing** | **Elevation** | **Easting RMS** | **Northing RMS** | **Elevation RMS** | **Lateral RMS** |
| GCP1 | -111000,61 | -66794,972 | 5,51 | 0,011 | 0,013 | 0,02 | 0,011 |
| GCP2 | -111004,02 | -66770,368 | 8,944 | 0,011 | 0,011 | 0,027 | 0,011 |
| GCP3 | -110971,42 | -66747,243 | 26,466 | 0,01 | 0,011 | 0,022 | 0,01 |
| GCP4 | -110971,37 | -66740,618 | 27,789 | 0,01 | 0,016 | 0,023 | 0,01 |
| GCP5 | -110934,68 | -66759,726 | 31,849 | 0,011 | 0,011 | 0,025 | 0,011 |
| GCP6 | -110952,2 | -66706,51 | 35,428 | 0,013 | 0,016 | 0,027 | 0,013 |
| GCP7 | -110952,42 | -66642,879 | 44,663 | 0,01 | 0,011 | 0,024 | 0,01 |
| GCP8 | -110992,86 | -66644,478 | 40,404 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,01 |
| GCP9 | -110995,49 | -66641,105 | 40,821 | 0,011 | 0,01 | 0,02 | 0,011 |
| GCP10 | -110916,76 | -66671,929 | 52,705 | 0,011 | 0,011 | 0,023 | 0,011 |
| GCP11 | -110927,47 | -66608,17 | 62,658 | 0,011 | 0,011 | 0,021 | 0,011 |
| GCP12 | -110922,15 | -66600,901 | 63,582 | 0,012 | 0,011 | 0,026 | 0,012 |
| GCP13 | -110925 | -66611,298 | 63,456 | 0,011 | 0,01 | 0,022 | 0,011 |
| GCP14 | -110876 | -66800,183 | 73,578 | 0,01 | 0,01 | 0,016 | 0,01 |
| GCP15 | -110910,69 | -66863,846 | 75,021 | 0,014 | 0,011 | 0,021 | 0,014 |
| GCP16 | -110929,55 | -66906,355 | 72,246 | 0,011 | 0,012 | 0,017 | 0,011 |