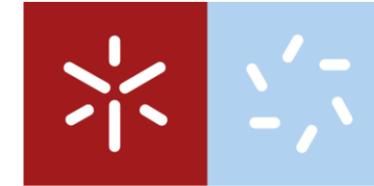




Morfodinâmica recente na zona costeira: o caso da praia de Pedrinhas e Cedovém

Ricardo Casal Jaques

UMINHO 2023

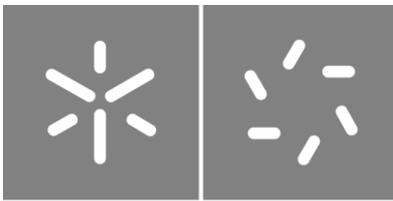


Universidade do Minho
Escola de Ciências

Ricardo Casal Jaques

Morfodinâmica recente na zona costeira: o caso da praia de Pedrinhas e Cedovém

Outubro de 2023



Universidade do Minho

Escola de Ciências

Ricardo Casal Jaques

**Morfodinâmica recente na zona
costeira: o caso da praia de Pedrinhas
e Cedovém**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Ciências e Tecnologias do Ambiente –
Monitorização e Remediação Ambiental

Trabalho realizado sob orientação do

Professor Doutor Renato Filipe Faria Henriques

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Agradecimentos

A realização deste trabalho, tal como este trajeto acadêmico só se tornou possível devido ao contributo de algumas pessoas, as quais desde já expresso a minha enorme gratidão:

Em primeiro lugar, ao meu orientador, o Professor Doutor Renato Henriques, pela partilha de grande quantidade de material do seu arquivo pessoal, de vital importância para este trabalho e ainda pela sua disponibilidade e auxílio em todas as fases deste trajeto.

A todos os professores da Escola de Ciências e colegas que se cruzaram comigo ao longo deste percurso acadêmico, que de alguma forma me ajudaram e ensinaram sempre alguma coisa.

À Cátia Oliveira, por todo o incentivo e ajuda ao longo dos anos, e por saber dizer sempre a palavra certa no momento certo, fosse ele bom ou mau, nunca permitindo que desistir fosse sequer uma opção.

Aos meus pais, pela paciência e possibilidade de poder frequentar o ensino superior e à minha irmã, pelo apoio e preocupação sempre demonstrada.

Por último, aos meus amigos pelo interesse e companheirismo demonstrados.

A todos eles, o meu profundo obrigado!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Morfodinâmica recente na zona costeira: o caso da praia de Pedrinhas e Cedovém

Resumo

As zonas costeiras são locais muito dinâmicos e suscetíveis a diversos riscos. A sua elevada dinâmica é consequência de fatores naturais, sendo, ainda assim, potenciada por fatores antrópicos. A elevada densidade demográfica da zona litoral e a sua crescente urbanização, como se verifica em Portugal, aumentam ainda mais a importância de uma monitorização regular e eficaz destes locais, principalmente nas zonas mais sensíveis.

A praia de Pedrinhas e Cedovém, no concelho de Esposende, foi selecionada, com o objetivo de avaliar diversos parâmetros, que permitam demonstrar eventuais mudanças ocorridas nos últimos anos, no sistema praia/duna. Estes parâmetros foram obtidos a partir de diferentes fontes, como fotografia aérea e dados obtidos por *Light Detection and Ranging* (LiDAR). Utilizando programas de aerofotogrametria, como o *Agisoft Metashape*, foi possível produzir Modelos Digitais de Superfície (MDS) e ortofotomapas. Recorrendo posteriormente a Sistemas de Informação Geográfica (SIG), como o QGIS, obtiveram-se mapas de variação altimétrica, perfis de projeção, foi possível avaliar a variação da linha de vegetação e projetar a sua evolução dentro de dez e vinte anos, calcular o balanço sedimentar para diferentes locais da área de estudo e ainda a criação de grelhas de balanço sedimentar. Para o local de estudo, também foi registada a sua flora, para perceber o estado de conservação ambiental do mesmo, destacando-se o elevado número de indivíduos de espécies invasoras na zona norte.

Os resultados obtidos permitem perceber o elevado dinamismo morfológico do local e demonstrar que ocorreu uma elevada perda sedimentar, com variação altimétrica negativa e consequente recuo da linha de costa em grande parte da área de estudo. Destaca-se, pela negativa, a periferia do núcleo das Pedrinhas. Por outro lado, a área mais a sul da área de estudo apresenta-se como a exceção, registando resultados mais estáveis nos diferentes parâmetros analisados (taxa de migração e balanço sedimentar).

Este trabalho permite concluir que grande parte da área de estudo tem sofrido uma acentuada erosão nos últimos anos. Além disso, as projeções futuras, para daqui a dez e vinte anos, apontam para que a evolução negativa do local se mantenha, colocando em risco os dois núcleos habitacionais e ainda os valores ambientais do local.

Palavras-chave: Monitorização, Morfodinâmica, QGIS, Sedimento, Vegetação.

Recent morphodynamics in the coastal zone: the case of Pedrinhas and Cedovém beach

Abstract

Coastal areas are very dynamic places and susceptible to various risks. Their high dynamics is a consequence of natural factors, but is also enhanced by anthropogenic factors. The high demographic density of the coastline and its increasing urbanisation, as seen in Portugal, further increase the importance of regular and effective monitoring of these sites, especially in the most sensitive areas.

Pedrinhas and Cedovém beach, in the municipality of Esposende, was selected for this study, with the aim of assessing various parameters that would allow us to demonstrate any changes that have occurred in recent years in the beach/dune system. These parameters were obtained from different sources, such as aerial photography and data obtained by Light Detection and Ranging (LiDAR). Using aerophotogrammetry programmes such as Agisoft Metashape, it was possible to produce Digital Surface Models (DSM) and orthophotomaps. Subsequently, using geographic information systems (GIS), such as QGIS, it was possible to obtain altimetry variation maps, projection profiles, assess vegetation line variation and project its evolution over ten and twenty years, calculate the sediment balance for different locations in the study area and create sediment balance grids. The flora of the study site was also recorded in order to understand its state of environmental conservation, highlighting the high number of invasive species in the northern area.

The results obtained show the high morphological dynamism of the site and demonstrate that there has been a high level of sediment loss, with negative altimetric variation and the consequent retreat of the coastline in a large part of the study area. The periphery of the Pedrinhas centre stands out in a negative light. On the other hand, the southernmost area of the study area is the exception, recording more stable results in the different parameters analysed (migration rate and sediment balance).

This work allows us to conclude that a large part of the study area has suffered a marked erosion in recent years. In addition, future projections for ten and twenty years from now indicate that the negative evolution of the site will continue, putting at risk the two housing centres and the environmental values of the site.

Keywords: Monitoring, Morphodynamic, QGIS, Sediment, Vegetation.

Índice

Capítulo 1 – Introdução e conceitos gerais	1
1.1. Introdução	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Zona costeira portuguesa	2
1.3.1. Programas da Orla Costeira	3
1.4. Praias e dunas	3
1.5. Fatores que influenciam a evolução costeira	4
1.5.1. Clima	4
1.5.2. Nível do mar	4
1.5.3. Neotectónica	5
1.5.4. Balanço sedimentar	5
1.5.5. Ventos	5
1.5.6. Marés e correntes de maré	6
1.5.7. Ondas	6
1.5.8. Sobrelevação de tempestade (<i>storm surge</i>)	6
1.5.9. Correntes costeiras	7
1.5.10. Correntes de retorno.....	7
1.6. Indicadores de migração costeira	7
1.7. Erosão costeira	8
1.7.1. Causas antrópicas da erosão costeira	8
1.7.2. Consequências da erosão costeira	9
1.7.3. Obras de defesa costeira	10
1.8. Monitorização	11
1.8.1. <i>Global Positioning System</i>	12
1.8.2. <i>Light Detection and Raging</i>	13
1.8.3. Veículos Aéreos Não Tripulados	14
1.8.4. Fotografia aérea.....	14
1.8.5. Fotogrametria	15
1.8.6. Ortofotomapas, Modelos Digitais de Terreno e Modelos Digitais de Superfície	16
1.8.7. Sistemas de Informação Geográfica	17
Capítulo 2 – Área de estudo	18

2.1. Enquadramento geográfico	18
2.2. Enquadramento geológico	19
2.3. Caracterização geomorfológica	20
2.4. Flora	26
2.5. Fauna	29
2.6. Fotografia aérea histórica	30
Capítulo 3 – Materiais e métodos	33
3.1. Materiais	33
3.1.1. QGIS	33
3.2. Metodologia	33
3.2.1. Modelos Digitais de Superfície	33
3.2.2. Cálculo de volumes e variação altimétrica	34
3.2.3. Criação de grelhas	36
3.2.4. Linha de vegetação	36
3.2.5. Perfis de projeção e evolução futura da linha de vegetação	37
Capítulo 4 – Resultados	40
4.1. Modelos Digitais de Superfície	40
4.2. Variação altimétrica e de volumes	42
4.3. Comparação do volume sedimentar	49
4.4. Linha de vegetação e perfis de projeção	51
4.5. Evolução futura	57
4.6. Síntese de resultados	59
Capítulo 5 - Conclusões	61
Referências	63

Índice de Figuras

Figura 1 – Segmentos do GPS. Adaptado de El-Rabbany (2002).	13
Figura 2 – Exemplo de mapa de LiDAR (NOAA).....	13
Figura 3 - Localização da praia de Pedrinhas e Cedovém. Sistema de Referências de Coordenadas ETRS89/Portugal TM06 - ESPG: 3763.....	18
Figura 4 - Excerto da folha 1 da Carta Geológica de Portugal, na escala 1:200000, com a respetiva ampliação e localização da área de estudo (Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG)).	19
Figura 5 - Aspeto da praia de Pedrinhas e Cedovém: (a) praia baixa e arenosa, seguida de dunas; (b) perspectiva da arriba de erosão.	21
Figura 6 - Aglomerado de seixos registado na zona sul da praia de Pedrinhas e Cedovém.	22
Figura 7 - Zona mais interior, a sul do núcleo de Cedovém.....	22
Figura 8 - Dunas migratórias, cobrindo o passadiço de acesso.	23
Figura 9 - Pequeno edifício em risco de derrocada.	23
Figura 10 - Paliçadas usadas para combater a migração das dunas: (a) parcialmente cobertas; (b) cobertas quase na sua totalidade.....	24
Figura 11 - Tentativas de parar o avanço do mar, desde paliçadas, sacos de areia e rochas: (a) núcleo de Cedovém; (b) ponta norte do núcleo das Pedrinhas.	25
Figura 12 - Enrocamento longilitoral do núcleo das Pedrinhas.....	26
Figura 13 - Flora autóctone registada na área de estudo: (a) cardo-marítimo (<i>Eryngium maritimus</i>); (b) granza-da-praia (<i>Crucianella maritima</i>).	27
Figura 14 - Flora autóctone registada na área de estudo: (a) madorneira (<i>Artemisia campestris spp. maritima</i>); (b) perpétua-das-areias (<i>Helichrysum italicum</i>); (c) mentastro (<i>Mentha suaveolens</i>).....	28
Figura 15 - Flora invasora registada na área de estudo: (a) chorão-das-praias (<i>Carpobrotus edulis</i>); (b) <i>Opuntia monacantha</i> ; (c) Povoamento denso de acácia-de-espigas (<i>Acacia longifolia</i>).	29
Figura 16 - Indivíduos da espécie caracol-das-ERVEJARIAS (<i>Theba pisana</i>) registados na área de estudo.	30
Figura 17 - Fotografia aérea histórica do local de estudo: (a) 1958; (b) 1965; (c) 1973; (d) 1974; (e) 1983.....	31
Figura 18 - Fotografia aérea histórica do local de estudo: (a) 1996; (b) 2014.	32
Figura 19 - Cálculo de volume utilizando o <i>plugin</i> "Volume Calculation Tool" no programa QGIS.....	35
Figura 20 - Janela da "Field Calculator" no programa QGIS.	35

Figura 21 - Janela da "Raster Calculator" no programa QGIS.....	35
Figura 22 - Janela de criação de uma grelha volumétrica no programa QGIS.....	36
Figura 23 - Linha de vegetação criada para o ano de 1974 no programa QGIS.....	37
Figura 24 - Configurações para a linha de base (à esquerda) e para a linha de costa (à direita) no módulo DSAS do programa ArcGis.....	38
Figura 25 – Configurações dos transectos no módulo DSAS do programa ArcGis.....	38
Figura 26 - (a) Modelo Digital de Superfície; (b) Modelo Digital de Superfície com <i>hillshade</i> , referentes ao ano de 2011.....	40
Figura 27 - (a) Modelo Digital de Superfície; (b) Modelo Digital de Superfície com <i>hillshade</i> , referentes ao levantamento de 2018.....	41
Figura 28 - (a) Modelo Digital de Superfície; (b) Modelo Digital de Superfície com <i>hillshade</i> , referentes ao levantamento de 2021.....	41
Figura 29 - Mapa de variação altimétrica entre o ano de 2011 e 2021.....	42
Figura 30 - Grelha de balanço sedimentar para o intervalo de tempo 2011-2021, com respetiva ampliação de uma área de interesse.....	43
Figura 31 - Grelha de balanço sedimentar para o intervalo de tempo 2011-2021, com respetiva ampliação de uma área de interesse.....	44
Figura 32 - Mapa de variação altimétrica entre o ano de 2018 e 2021.....	45
Figura 33 - Grelha de balanço sedimentar para o intervalo de tempo 2018-2021, com respetiva ampliação de uma área de interesse.....	46
Figura 34 - Grelha de balanço sedimentar para o intervalo de tempo 2018-2021, com respetiva ampliação de uma área de interesse.....	47
Figura 35 - Polígonos criados para o cálculo de volume entre 2011-2021 e 2018-2021.....	49
Figura 36 - Linhas de vegetação de diferentes anos para toda a área de estudo.....	51
Figura 37 - Linhas de vegetação de diferentes anos: (a) para a extremidade norte, junto ao esporão; (b) para o núcleo das Pedrinhas.....	52
Figura 38 - Linhas de vegetação de diferentes anos: (a) para a zona a sul do núcleo das Pedrinhas, até grande parte do núcleo de Cedovém; (b) para a extremidade sul.....	53
Figura 39 - Perfis de projeção referentes aos intervalos de tempo: (a) 1958-2012; (b) 1958-2021; (c) 2012-2021.....	54
Figura 40 – Previsão da linha de vegetação dentro de 10 e 20 anos, relativa ao setor norte da área de estudo.....	57

Figura 41 – Previsão da linha de vegetação dentro de 10 e 20 anos, para os setores central e sul da área de estudo. 58

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Resultados do balanço sedimentar entre 2011 e 2021. 50

Tabela 2 - Resultados do balanço sedimentar entre 2018 e 2021. 50

Abreviaturas e siglas:

APA - Agência Portuguesa do Ambiente

COSMO - Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental

DGPS - *Differential Global Positioning System*

DGT - Direção-Geral do Território

DSAS - *Digital Shoreline Analysis System*

EPR - *End Point Rate*

GPS - *Global Positioning System*

IGeoE - Instituto Geográfico do Exército

LiDAR - *Light Detection and Ranging*

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia

LRR - *Linear Regression Rate*

MDS - Modelo Digital de Superfície

MDT - Modelo Digital de Terreno

NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*

NSM - *Net Shoreline Movement*

OSGeo - *Open Source Geospatial Foundation*

PIB - Produto Interno Bruto

PNLN - Parque Natural do Litoral Norte

POC - Programa da Orla Costeira

SCE - *Shoreline Change Envelope*

SIG - Sistemas de Informação Geográfica

VANT - Veículo Aéreo Não Tripulado

WLR - *Weighted Linear Regression*

Capítulo 1 – Introdução e conceitos gerais

1.1. Introdução

No desenvolvimento da sociedade como a conhecemos, as zonas costeiras sempre desempenharam um papel importante. Serviram de base para o nascimento dos primeiros povoados e dos primórdios da agricultura e inúmeras grandes cidades mundiais desenvolveram-se ao longo de zonas costeiras (Hanson & Lindh, 1993). Como consequência, as zonas costeiras apresentam uma maior densidade demográfica que as zonas mais interiores (Neumann *et al.*, 2015).

Portugal apresenta uma linha de costa com uma grande extensão e elevada densidade populacional (Tavares *et al.*, 2021). A costa portuguesa perfila-se como uma costa altamente dinâmica e energética, estando por consequência sujeita a diversos fatores de risco. A migração costeira é um fenómeno natural que sempre ocorreu, mas nas últimas décadas, diversos fatores antrópicos têm potenciado o seu aumento (Neumann *et al.*, 2015).

A zona de Esposende não é exceção. Em locais como a praia de Pedrinhas e Cedovém, os problemas decorrentes da dinâmica que afetam a zona costeira podem ser de gravidade acentuada.

Devido às características das zonas costeiras, é necessário ter um conhecimento sobre a dinâmica costeira, efetuar uma monitorização regular e avaliar a especificidade de cada local, para, no caso de uma eventual intervenção, poderem ser tomadas as medidas mais adequadas, que permitam um equilíbrio entre a segurança das pessoas e a proteção dos valores históricos e naturais.

1.2. Objetivos

Este trabalho apresenta como área de estudo a praia de Pedrinhas e Cedovém e tem como objetivos a caracterização geomorfológica da área em estudo, o processamento dos dados de mobilidade costeira dos últimos anos através de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e a avaliação das mudanças ocorridas no local nos últimos anos. Além disso, é objetivo desta dissertação determinar o balanço sedimentar e a variação altimétrica, entre os anos 2011 e 2021 e entre 2018 e 2021, e estudar a evolução morfodinâmica do sector, avaliando simultaneamente o estado e possíveis alterações ocorridas nos valores naturais, como a vegetação.

1.3. Zona costeira portuguesa

Definir zona costeira não é uma tarefa simples, pois existem várias definições, dos mais variados autores. Ainda assim, podemos defini-la como uma área do território que sofre influência, tanto direta, como indireta do mar, e se estende para o lado do mar até ao limite das águas territoriais, incluindo o leito, e apresenta, para o lado da terra, a largura de 2 km, medida a partir da linha da máxima preia-mar de águas vivas equinociais (Santos *et al.*, 2014).

Quanto à sua caracterização natural, a costa portuguesa é muito diversa, apresentando diversos sistemas morfo-sedimentares, como estuários, lagoas, ilhas barreira, praias, dunas e arribas (Andrade *et al.*, 2002) citado por Ponte Lira *et al.* (2016).

Quando abordamos o tema da geomorfologia e dinâmica sedimentar, a zona litoral portuguesa é dividida em oito células sedimentares: 1) Rio Minho – Nazaré; 2) Nazaré – Peniche; 3) Peniche – Cabo Raso; 4) Cabo Raso – Cabo Espichel; 5) Cabo Espichel – Sines; 6) Sines – Cabo São Vicente; 7) Cabo São Vicente – Olhos de Água e 8) Olhos de Água – Boca do Guadiana (Santos *et al.*, 2014).

Portugal apresenta 987 km de costa, e segundo a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) (2022), 26% do litoral está ocupado com construções. Relativamente à defesa costeira, Portugal tem a sua costa “protegida” por diversos tipos de estruturas, desde esporões, quebra-mares, molhes, instalações portuárias, entre outras, resultando em 14 % da costa protegida por estruturas artificiais, o equivalente a 140 km de costa (APA, 2022).

Como referido anteriormente, a costa portuguesa apresenta uma elevada densidade demográfica, tendo como consequência, o facto de 80 % do produto interno bruto (PIB) estar aí concentrado. Além disso, também estão presentes grande parte das infraestruturas públicas e privadas (Tavares *et al.*, 2021). A ocupação do litoral português é um fenómeno recente, que ocorreu já depois do século XIX, quando a população do interior abandonou a agricultura e migrou para o litoral em busca de melhores condições de vida. Em tempos mais antigos, o litoral não era um local muito atrativo para as populações, pois estavam constantemente sob o risco de ataques de pirataria bem como de episódios de tempestade. Atualmente, grande parte da população portuguesa vive entre Viana do Castelo e Setúbal e entre Lagos e Olhão, o que exemplifica bem o despovoamento do interior (Ferreira, 2014).

Um sector que está intrinsecamente ligado à zona costeira é o turismo. Em Portugal, o turismo, no ano de 2010, representava cerca de 3,6 % do PIB (Ferreira, 2014). Além do turismo, diversos setores estão dependentes da costa, como a pesca, comércio internacional, atividades de recreio e lazer, produção de energia, etc.

Concluindo, podemos perceber que a zona costeira portuguesa desempenha um papel importante a vários níveis, sendo eles demográfico, social, económico, histórico e ambiental (Tavares *et al.*, 2021).

1.3.1. Programas da Orla Costeira

Os Programas da Orla Costeira (POC) são os documentos que regulam a gestão costeira e possíveis intervenções. De acordo com o Decreto-Lei n.º 159/2012, de 24 de julho, devem refletir e estabelecer opções estratégicas para a proteção e integridade biofísica, a valorização dos recursos naturais e a conservação dos valores ambientais e paisagísticos, configurando tais instrumentos como um elemento fundamental na proteção, preservação e gestão dos recursos hídricos. Segundo a APA, os POC estabelecem regimes de salvaguarda de recursos e valores naturais, através de normas e princípios de gestão e orientação e abrangem uma faixa ao longo do litoral, designada zona terrestre de proteção, com largura máxima de 500 metros (contados a partir do limite das águas do mar para terra), e uma faixa marítima de proteção (até à barimétrica dos 30 metros).

As áreas sob jurisdição portuária estão excluídas destas zonas de proteção (Decreto-Lei n.º 159/2012, de 24 de julho).

Foram criados nove diferentes POC: Caminha - Espinho; Ovar - Marinha Grande; Alcobaça - Mafra; Cidadela - São Julião da Barra; Sintra - Sado; Sado - Sines; Sines - Burgau; Burgau - Vilamoura; Vilamoura - Vila Real de Santo António (APA, 2022).

Relativamente a questões de ordem legal, as águas costeiras e praias, em Portugal, são de domínio público e existem diferentes instituições públicas para lidar com as zonas costeiras, tanto a um nível local como a nível nacional (Marinho *et al.*, 2019).

1.4. Praias e dunas

As praias são geoformas formadas por acumulação de sedimentos não consolidados, geralmente de areia e cascalho, compreendendo domínios emerso e submerso (Santos *et al.*, 2014). São variáveis na sua largura e na espessura dos sedimentos, dependentes da agitação do mar e da alimentação em sedimentos que a corrente longitudinal transporta. No limite interior das praias podem observar-se as dunas, geoformas de areia acumulada pelo vento. As dunas podem ser classificadas em dunas móveis e fixas (presentes na área de estudo). As dunas móveis estão sempre em movimento e podem ser barcanes, em domo, transversais, entre outras. Por outro lado, as dunas fixas estão relacionadas com

vegetação, obstáculos topográficos ou uma fonte sedimentar e podem ser do tipo *blowout*, frontais, parabólicas, entre outras. No concelho da área de estudo, Esposende, existe uma duna frontal, possivelmente medieval, a ser degradada pelo mar (Gomes *et al.*, 2002).

1.5. Fatores que influenciam a evolução costeira

Toda a dinâmica e evolução da orla costeira é influenciada por diferentes fatores. O clima, nível do mar e neotectónica atuam a uma mega-macro escala temporal. Por outro lado, o balanço sedimentar e os processos costeiros, como as ondas, ventos e correntes (principalmente em épocas de tempestade), atuam a uma meso-micro escala temporal no balanço entre a deposição e erosão de sedimentos.

1.5.1. Clima

Na história mais recente da Terra, ou seja, nos últimos dois milhões de anos, sempre ocorreram grandes variações climáticas, alternando entre episódios de arrefecimento (glaciários) e episódios de aquecimento (interglaciários). De acordo com a teoria de Milankovitch, publicada em 1924 (Loutre, 2003), estas variações climáticas são cíclicas, relacionadas com elementos de variação dos parâmetros orbitais terrestres e a inclinação do seu eixo, e são ainda condicionadas pela intrusão de grandes áreas de rochas ígneas, vulcanismo, posição dos continentes, formação de cadeias montanhosas, controlo por microrganismos marinhos, impactos meteoríticos e variações de outros fatores astronómicos não mencionados por Milankovitch. Estas mudanças no clima provocam alterações na quantidade de energia solar, nomeadamente na sua distribuição sazonal e geográfica pela superfície do planeta, afetando, em longos períodos, a formação e fusão das massas de água gelada. Os geoindicadores são os testemunhos desses climas antigos, que ficaram registados em ambientes de deposição originados pelas variações climáticas (Henriques, 2006; Loureiro, 2006).

1.5.2. Nível do mar

As variações do nível do mar têm uma elevada importância nas mudanças da zona costeira. O fenómeno de variação global do nível do mar é denominado de eustatismo, e pode ser originado por várias causas relacionadas com os oceanos, como o glacio-eustatismo, termo-eustatismo, tectono-eustatismo,

eustatismo geoidal, sedimento-eustatismo e subsidência hidro-isostática. Em períodos de subida do nível do mar, ocorrem episódios de transgressões marinhas, ou seja, a linha de costa migra na direção da terra e em períodos de descida do nível do mar, ocorrem episódios de regressões marinhas, em que a linha de costa migra na direção do mar (Loureiro, 2006).

1.5.3. Neotectónica

A localização do território português entre as placas Euro-Asiática, Africana e Norte-Americana, influencia a sua atividade neotectónica. Este contexto provoca movimentos tectónicos convergentes, divergentes (rifting) e de falhas transformantes, resultando em deformações de origem recente entre a interface oceano-continente e reativação de antigas falhas (Loureiro, 2006). Durante o período Quaternário, no litoral português terá ocorrido um levantamento de 0,1 mm/ano a 0,13 mm/ano (Cabral, 1986) citado por Loureiro (2006). Todavia, na ausência de episódios de deformação brusca, o efeito da neotectónica na erosão costeira processa-se de forma bastante lenta (Henriques, 2006).

1.5.4. Balanço sedimentar

O balanço sedimentar é o resultado entre os ganhos e perdas sedimentares. Está relacionado a uma meso-escala com outros fatores que afetam as zonas costeiras, como os processos costeiros, meteorológicos e atividade humana. Atualmente, as fontes de abastecimento (plataforma continental e contributo fluvial), não conseguem repor o volume de sedimentos perdido para zonas mais profundas. As atividades antrópicas contribuem para agudizar este problema, em especial os aproveitamentos hidroelétricos nos rios. Variações do binómio temperatura-precipitação são também uma das causas naturais deste problema (Loureiro, 2006).

1.5.5. Ventos

O vento desempenha um papel importante no transporte de sedimentos, sendo o principal responsável pela formação de dunas (Maia, 2021). As migrações periódicas da frente polar, no verão e no inverno, determinam as condições meteorológicas predominantes em Portugal continental. No Verão, a situação meteorológica é bastante estável, devido à influência da crista nordeste do Anticiclone dos Açores, juntamente com a Depressão de origem térmica que se abate sobre a Península Ibérica. Assim, as

condições meteorológicas apresentam-se boas, com céu limpo, altas temperaturas, vento fraco e pouca precipitação, ainda que por vezes se possa fazer sentir a chamada Nortada, resultado da associação de altas com baixas pressões, formada no centro da Península Ibérica.

Contudo, no Inverno, Portugal continental é atingido por depressões subpolares, que provocam precipitações abundantes, temperaturas médias relativamente baixas e ventos de quadrante oeste. Aquando da aproximação ou passagem dos sistemas frontais das depressões subpolares, os ventos sopram de sul ou de sudoeste. Devido à circulação de um Anticiclone continental, podem surgir condições com vento predominante de nordeste ou este, e ar frio e seco (Loureiro, 2006).

1.5.6. Marés e correntes de maré

A zona costeira noroeste de Portugal localiza-se na zona de transição de meso marés para macro marés. Quanto à amplitude, as marés portuguesas variam desde pouco mais de 1 metro em marés mortas até 4 metros em marés vivas. As correntes de maré, ou seja, movimentos horizontais de massas de águas, são importantes na circulação e redistribuição de sedimentos, nomeadamente em estuários, lagunas e nos locais onde os rios desaguam. Os fatores que definem estas correntes de maré são as características da própria maré e da costa, a rotação da Terra e ainda a batimetria (Loureiro, 2006).

1.5.7. Ondas

Relativamente à energia das ondas, a costa oeste e a costa sul são diferentes. A costa oeste, devido à sua exposição ao Atlântico Norte, é representada por ondas de alta energia, com ondulação noroeste, refletindo-se em altos valores de transporte sedimentar e em episódios de tempestade. Por outro lado, a costa sul encontra-se protegida da ondulação noroeste, resultando em ondas de energia moderada e um menor transporte sedimentar (Ponte Lira *et al.*, 2016; Tavares *et al.*, 2021).

As tempestades que atingem a costa portuguesa, nomeadamente a costa de Esposende, têm origem em depressões ou superfícies frontais e podem ser tempestades de noroeste, oeste ou sudoeste (Loureiro, 2006).

1.5.8. Sobrelevação de tempestade (*storm surge*)

A sobrelevação do nível do mar resulta da conjugação de vários fatores, sendo o mais importante a diminuição da pressão atmosférica associada à passagem de uma depressão. Num determinado caso,

em que o vento sopra a 80 km/h, durante 12h, a sobrelevação do mar será de 1 metro (Paskoff, 1998) citado por Loureiro (2006). Esta subida é mais acentuada em períodos de marés vivas ou quando ocorrem efeitos de ressonância das ondas (Loureiro, 2006).

1.5.9. Correntes costeiras

As correntes costeiras podem ser longitudinais, transversais e correntes de fluxo-refluxo. Desempenham um papel importante na dinâmica sedimentar das praias e podem transportar partículas argilosas, limos, areias, além de seixos, por diferentes tipos de deslocação, desde suspensão, saltação e tração. Aquando do rebentamento da onda, a energia libertada é suficiente para provocar o movimento dos sedimentos depositados. No litoral de Esposende, a deriva litoral é predominantemente norte-sul (Loureiro, 2006).

1.5.10. Correntes de retorno

Podem ser definidas como fluxos de água, que escoam da praia para o exterior da zona de rebentação, ocorrendo com mais frequência em praias arenosas e podendo apresentar uma forte intensidade. A rebentação da onda transporta a água acima do nível médio do mar, sob a forma de ressaca e espraçamento. Posteriormente, com o efeito gravítico, ocorre um retorno da água ao mar, podendo encontrar outra onda a quebrar, originando assim um efeito de barreira temporário. O volume desta água armazenada acima do nível do mar vai aumentando, até que atinge um ponto em que a cabeça hidráulica dessa água se torna maior que o espraçamento da onda, sendo então iniciado o fluxo em direção ao mar, sob a forma de corrente de retorno (Loureiro, 2006).

1.6. Indicadores de migração costeira

A migração da orla costeira resulta de processos naturais. Contudo, nalguns casos, é fortemente potenciada por fatores de origem antrópica (Perez *et al.*, 2010).

Segundo Henriques (2006), são vários os indicadores de migração costeira, sendo os mais utilizados os que se apresentam como alinhamentos paralelos à orientação da costa, ou, numa linguagem mais comum, designados por “linhas”. Estes indicadores permitem saber se a migração é influenciada por ação natural ou antrópica, a sua velocidade e sentido, podendo ainda permitir traçar cenários de evolução futura.

Alguns dos indicadores mais comumente utilizados são a linha de vegetação, linha de vegetação da duna estável, escarpa de erosão, linha de detritos, linhas de preia-mar, preia-mar mais antiga e preia-mar média, linha de espraiamento da onda, ponto de saída de água subterrânea, linha de água instantânea, linha de rebentação das ondas, linha média de baixa-mar e degrau da praia (Boak *et al.*, 2005; Henriques, 2006).

1.7. Erosão costeira

A erosão costeira pode ser definida como a remoção e arrastamento dos sedimentos das praias e dunas, por ação conjugada de agentes naturais como as ondas, ventos e correntes, traduzindo-se num recuo da linha de costa e conseqüente perda de território (Gault *et al.*, 2010). A definição remete a erosão costeira para a sua origem natural, e os fatores que podem influenciar a dinâmica das zonas costeiras foram referidos anteriormente. No entanto, a erosão costeira, tem sido frequentemente potenciada pela ação humana (Gonçalves & Henriques, 2015).

Existem três categorias de resposta no que respeita ao combate à erosão: “retirada”, “acomodação” e “proteção” (Williams *et al.*, 2018). Cada local apresenta uma natureza e especificidade própria, o que resulta numa maior dificuldade na aplicação de medidas.

1.7.1. Causas antrópicas da erosão costeira

As causas antrópicas que potenciam a erosão costeira são:

- Revestimento e artificialização das margens ribeirinhas, assim como a construção de diques e barragens - provocam a diminuição do transporte sedimentar. Um dos efeitos das construções de barragens é o controlo das cheias. As cheias transportavam uma enorme quantidade de sedimentos até à foz, ou seja, sem a ocorrência de cheias, a taxa de reposição sedimentar na zona da foz diminui bastante (Ferreira, 2014). Estima-se que, atualmente, as barragens retenham mais de 80 % dos volumes de areias, que eram transportados pelos rios, antes das construções das mesmas (Santos *et al.*, 2014). Esta redução do transporte sedimentar é explícita em vários dados. Dando como exemplo a região Norte de Portugal, em 1930, ou seja, antes da construção das barragens, o transporte sedimentar no litoral norte era de $2 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{ano}$,

com o rio Douro a contribuir com 90 % deste valor. Atualmente, o rio Douro apenas fornece $2,5 \times 10^5 \text{ m}^3$ / ano (Gomes *et al.*, 2006; Ramos, 2011);

- Construção de obras de defesa costeira - dando como exemplo os esporões, em certos locais, estes resolvem o problema da erosão a barlar, ocorrendo aí acreção da costa, mas provocam problemas a sotamar, provocando erosão (Pedrosa, 2013; Perez *et al.*, 2010);
- Constante urbanização da costa - provoca um aumento da impermeabilização do solo (Tavares *et al.*, 2021). Em Portugal, com o seu alto fluxo turístico e a construção de ainda mais infraestruturas em zonas de praia, este é um sério problema, pois em caso de perda de território para o mar, existem diversos bens e pessoas que estão em risco;
- O pisoteio e a circulação de veículos nas dunas - resulta na destruição da vegetação, originando corredores eólicos, que permitem a migração das dunas para o interior (Gomes *et al.*, 2002);
- Dragagem dos canais de navegação - é retirada uma grande quantidade de sedimento, que, na maioria das vezes, não é repostado, causando um desequilíbrio (Hanson & Lindh, 1993);
- Subida do nível do mar - é uma causa natural, mas que tem sido acelerada por ação antrópica. As projeções preveem a contínua subida do nível do mar e o aumento de tempestades (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007; Tavares *et al.*, 2021).

Em Portugal, a problemática da erosão costeira foi agravada por um fator adicional. Até ao ano de 2006, era permitida a retirada do sedimento para comercialização e usos variados (Marinho *et al.*, 2019).

1.7.2. Consequências da erosão costeira

As consequências da erosão costeira podem manifestar-se de variadas formas:

- Perda de território para o mar, sendo provável que ocorra um aumento dos episódios de inundações costeiras, o que eventualmente poderá significar a perda de bens materiais, como habitações e um aumento do risco à segurança das pessoas. A ocorrência dessas cheias e inundações pode ainda provocar a destruição de estruturas de defesa costeira e outro tipo de infraestruturas;
- Prejuízos na agricultura, pois num processo de inundação por parte do mar, ou seja, de salinização, dificilmente os solos voltam a ser férteis (Hanson & Lindh, 1993). Se atentarmos ao concelho de Esposende, que engloba a área de estudo, este é potencialmente vulnerável a este problema, pois na zona norte do concelho (freguesias de Marinhas, Mar e Belinho), existem inúmeros campos agrícolas a poucos metros da praia;

- Impactes na economia. A título de exemplo no que respeita aos impactes económicos, em Portugal, entre o ano de 1995 e 2014, as despesas públicas para a proteção da costa contra a erosão costeira e cheias alcançaram os 196 milhões de euros (Marinho *et al.*, 2019);
- Perda de valores naturais, desde a destruição total de habitats, fundamentais para diversas espécies, como as aves marinhas, ao desaparecimento da própria fauna e flora. Esta perda poderá apresentar ainda uma gravidade acentuada, pois, nas zonas costeiras, habitam muitas espécies endémicas, ou seja, que não ocorrem em mais nenhum local do planeta, o que eventualmente poderá significar a extinção de determinada espécie. A vegetação tem ainda uma importância acrescida, para o combate à erosão costeira. A presença de vegetação impede a formação de corredores eólicos, permitindo a estabilização das dunas e evitando a sua migração para o interior;
- Por último, a erosão costeira pode significar a perda de valores históricos, vestígios e sítios arqueológicos, desde as grutas costeiras de Gibraltar, onde se encontram vestígios do homem de Neandertal (*Homo neandertalensis*), aos templos da ilha da Páscoa, às antigas salinas romanas encontradas em alguns locais da costa de Portugal (Erlandson, 2012).

1.7.3. Obras de defesa costeira

Existem diversos tipos de estruturas e técnicas quando o tema é a defesa costeira, podendo estes ser esporões, quebra-mares, cilindros geossintéticos, entre outros. No concelho de Esposende e concelhos vizinhos, foram construídos alguns esporões e quebra-mares nas décadas de 80, 90 e 00. Todos eles apresentam vantagens e desvantagens (Williams *et al.*, 2018) :

- Esporões - têm como objetivo impedir o transporte de sedimentos na longitudinal. As vantagens principais são a sua fácil e rápida construção, e uma durabilidade de até 50 anos, quando utilizado o material adequado. As principais desvantagens que os esporões apresentam são o facto de, em muitos casos, apresentarem sucesso a barlar, pois aí ocorre a acumulação de sedimentos, mas por outro lado, intensificarem problemas de erosão a sotamar, o que por sua vez também exige um constante fornecimento de sedimento;
- Quebra-mares - têm como objetivo a interseção das ondas incidentes e refratadas, podendo, por vezes, ser construídos totalmente submersos. A sua vantagem é promoverem a acumulação de sedimento na praia. Contudo, são estruturas de elevado tamanho e custo, podendo ainda

provocar problemas ao nível da navegação, da segurança e da qualidade da água. A sua construção implica ainda águas com profundidades significativas;

- Muros de mar ou enrocamentos longilitorais - construídos paralelamente à linha de costa. Eficazes no combate à erosão e inundações, são também resistentes à exposição severa e seguros para uso público. Apesar disso, registam uma baixa energia de absorção, ou seja, uma alta taxa de reflexão das ondas, são normalmente de custo elevado e limitam o acesso ao mar. A médio prazo provocam o desaparecimento da praia e o aprofundamento da cota de sedimento, levando ao aumento da energia das ondas na sua frente, ao aumento do galgamento da própria estrutura e desmantelamento;
- Revestimentos rochosos - apresentam semelhanças com os muros de mar, mas são formados por um elevado conjunto de rochas de grande tamanho. São mais baratos que os muros de mar, requerem pouca manutenção, registam um bom desempenho hidráulico e de dissipação de energia. As desvantagens são idênticas às apresentadas para os muros de mar;
- Alimentação artificial da praia - o aspeto natural que gera na praia, sem a introdução de estruturas artificiais é o principal ponto positivo desta técnica. Todavia, não combate a causa da erosão do local, funcionando apenas como uma forma de atenuar as consequências da erosão e é necessária uma reposição regular de sedimento, o que pode tornar-se dispendioso;
- Cilindros geossintéticos - a sua fácil instalação e a possibilidade de utilizar areia do próprio local para enchimento são os aspetos positivos deste tipo de estrutura. Não obstante, apresentam problemas, como a elevada suscetibilidade à erosão e o problema ambiental em que se tornam quando começam a degradar-se.

1.8. Monitorização

Decorrente da elevada dinâmica que as zonas costeiras apresentam, é necessário ter um conhecimento sobre os processos naturais que nelas acontecem e simultaneamente dos fatores antrópicos que poderão estar a influenciar a dinâmica natural do local.

Segundo Henriques (2006), os objetivos da monitorização abrangem:

- Identificação, compreensão e quantificação dos fatores de dinâmica costeira;
- Determinação da duração dos processos e da área geográfica afetada;
- Estabelecimento de relações entre fatores climáticos e meteorológicos;
- Previsão da evolução dos processos;

- Prestação de apoio a operações de planeamento e ordenamento, e avaliação dos impactes positivos e negativos decorrentes dessas operações.

O trabalho inicial de um processo de monitorização deve passar pela procura de todo o material e dados sobre a área de estudo, como fotografia aérea, artigos e todo o tipo de informação sobre a evolução costeira passada que exista sobre o local. Além disso, devem ser obtidos dados, como a ondulação, extração de areias, dados meteorológicos, etc.

Perceber o que se deve monitorizar é um aspeto fundamental. Podemos diferenciar dois tipos de setores costeiros a monitorizar, sendo eles, setores com migração para o interior em zonas não habitadas e setores com migração para o interior em zonas habitadas ou com interesse agrícola ou industrial.

De uma maneira geral, sempre que a evolução da orla costeira apresente um risco às atividades humanas, apresenta também um fator determinante para definir um programa de monitorização, que deve ser contínuo e detalhado, para que seja possível uma avaliação contínua do risco que a migração da praia para o interior representa. Nos casos em que a migração da orla costeira para o interior ocorra em locais desabitados, ou sem interesse histórico ou agrícola, apenas deve acontecer um acompanhamento da evolução natural do sistema (Henriques, 2006).

Existem diversas técnicas de monitorização, desde a observação direta e fotografia, utilização de *Global Positioning System* (GPS), SIG, deteção remota através de fotografia aérea com recurso a Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) e ainda obtenção de fotografia aérea e de altimetria com recurso ao *Light Detection and Raging* (LiDAR).

Finalmente, um programa de monitorização, deve ter em consideração a especificidade de cada local e ser eficiente em termos financeiros (Henriques, 2006).

1.8.1. *Global Positioning System*

O GPS é um sistema de navegação por satélite, desenvolvido pelo Departamento de Defesa Americano. Permite a determinação exata de uma posição (x, y e z), em qualquer lugar do planeta.

Para uma maior precisão e certeza dos resultados, é utilizado o *Differential Global Positioning System* (DGPS), sendo muito importante em estudos de dinâmica costeira. Funciona com dois recetores, um de referência e com posição conhecida (Base), e outro móvel (Rover), o qual se pretende determinar a posição (Gomes, 2018; Henriques, 2006).

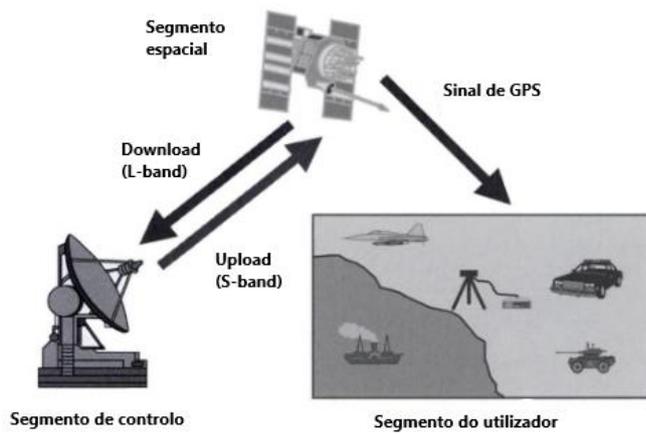


Figura 1 – Segmentos do GPS. Adaptado de El-Rabbany (2002).

1.8.2. *Light Detection and Raging*

O LiDAR é uma tecnologia ótica de deteção remota, que utiliza a luz sob a forma de um laser pulsado para medir distâncias à Terra. Estes impulsos de luz geram informação precisa e tridimensional sobre a forma da Terra e as características da sua superfície. Esta tecnologia funciona principalmente com três componentes principais, um laser, um scanner e um recetor GPS especializado.

São utilizados helicópteros ou aeronaves como plataformas para aquisição de dados em grandes áreas e o LiDAR pode dividir-se em dois tipos, topográfico e altimétrico. As aplicações desta tecnologia são várias, desde a produção de mapas mais exatos da orla costeira, de Modelos Digitais de Terreno (MDT) para usar em SIG e até respostas a operações de emergência (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2023).

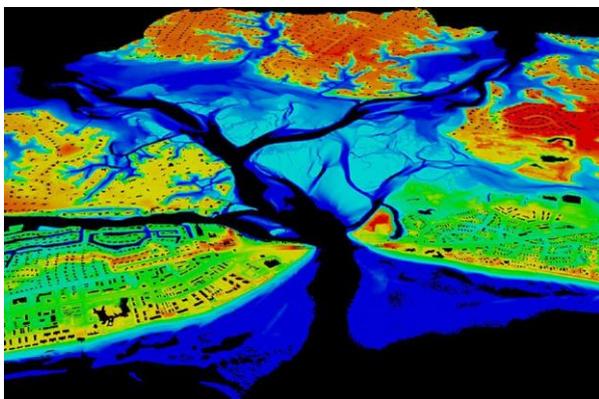


Figura 2 – Exemplo de mapa de LiDAR (NOAA).

1.8.3. Veículos Aéreos Não Tripulados

Os VANT surgiram como mais uma opção, além da fotogrametria e do LiDAR, para o estudo da evolução costeira. Estes aparelhos podem ser controlados manualmente, através de um controlo remoto, voar automaticamente ou semi-automaticamente, ou ainda apresentar uma combinação destas características. Estes aparelhos podem ser equipados com câmaras fotográficas ou videográficas, sensores LiDAR e ainda câmaras com sistemas de infravermelhos, térmicos e multiespectrais (Eisenbeiss, 2009; Gomes, 2018).

Os VANT apresentam algumas vantagens em relação aos veículos convencionais (Eisenbeiss, 2009), tais como:

- podem ser usados em situações de alto risco e áreas inacessíveis, sem colocarem em causa vidas humanas, voar a baixa altitude (evitando assim as nuvens) e perto de objetos. Posto isto, podem ser muito úteis para trabalhar em desastres naturais, como situações de vulcanismo, terremotos, cheias e acidentes;
- rápida aquisição de informação, enquanto transmitem dados de orientação, vídeo e imagem para o ponto de controlo no solo;
- não apresentam as limitações físicas e os gastos económicos que um piloto humano apresenta.

Contudo, estes aparelhos também apresentam algumas desvantagens (Eisenbeiss, 2009):

- limitação a sensores e câmaras fotográficas amadoras de menor resolução, devido ao peso da aeronave (o que também implica uma maior obtenção de imagens);
- motores, na maioria das vezes, com potência reduzida e pouca autonomia de voo (limita a altitude e a área geográfica coberta);
- software e hardware caro para o posterior tratamento de dados;

1.8.4. Fotografia aérea

A fotografia aérea começou a ser usada, ainda a preto e branco, nos últimos anos da década 20 do século passado, mas só entre o fim da década de 30 e o início da década de 40 é que foi possível a sua utilização com maior qualidade (Moore, 2000). Em Portugal, foi o Exército que iniciou a sua utilização, nomeadamente através do Instituto Geográfico do Exército (IGeoE) (Henriques, 2006).

Segundo Henriques (2006), a fotografia aérea constitui o melhor método de monitorização contínua para o estudo da evolução das zonas costeiras. É um instrumento eficaz de análise da evolução geomorfológica, pois permite registar o aspeto superficial de uma determinada área, com um detalhe elevado. Os levantamentos fotográficos, sempre que possível, devem ser realizados na mesma altura do ano, em condições meteorológicas, de maré e de ondulação semelhantes, e não deve existir um grande intervalo de tempo entre eles.

Contudo, as fotografias aéreas podem ser enviesadas pelas linhas costeiras “pós tempestades”. Além disso, são distorcidas, devendo ser corrigidas, antes de poderem ser utilizadas para uma análise da linha costeira. Como o resultado da fotografia aérea é uma projeção plana de uma superfície tridimensional centrada num ponto, os objetos mais afastados apresentam maior deformação tangencial. A deformação é maior quanto menor for a altitude. As distorções mais comuns incluem distorção radial e de relevo, inclinação da aeronave e variações de escala causada por mudanças na altitude ao longo de uma linha de voo.

A fotografia aérea, quando conjugada com outras técnicas, como fotogrametria digital ou GPS, permite converter fotografias aéreas digitalizadas em MDT e em ortofotografias, gerando assim muita informação e de qualidade sobre o local (Boak *et al.*, 2005; Freitas Gomes, 2018; Henriques, 2006).

1.8.5. Fotogrametria

A fotogrametria é quase tão antiga como a fotografia, tendo sido desenvolvida há já mais de um século. Pode ser definida como a ciência que, a partir de medições efetuadas sobre fotografia aérea bidimensional, estuda e tem como objetivo a representação tridimensional da superfície topográfica (Aber *et al.*, 2010; Henriques, 2006).

Evoluiu de uma técnica analógica, ótico-mecânica, para modelos analíticos baseados na solução de algoritmos matemáticos assistida por computador e, finalmente, para a fotogrametria digital, assente em imagens digitais e visão por computador, e desprovida de qualquer hardware opto-mecânico. A fotogrametria pode ser aérea (com a câmara no ar), ou terrestre (com a câmara na mão ou no tripé) (Aber *et al.*, 2010).

A fotogrametria inclui várias aplicações, como a medição de coordenadas, quantificação de distâncias, pesos, áreas e volumes. Permite ainda a produção de ortofotografias, ortofotomapas e MDT, podendo posteriormente ser utilizados em ambiente SIG (Aber *et al.*, 2010; Freitas Gomes, 2018).

1.8.6. Ortofotomapas, Modelos Digitais de Terreno e Modelos Digitais de Superfície

Como referido anteriormente, as fotografias aéreas apresentam distorções, que necessitam de ser corrigidas. A correção das distorções de uma fotografia aérea é chamada de ortorretificação. Depois de corrigidas todas as distorções, obtém-se então uma ortofotografia, ou seja, uma correta projeção da superfície terrestre fotografada. Por último, um ortofotomapa é o resultado de uma, ou de um mosaico de várias ortofotografias, associada(s) com informação geográfica (sistema de coordenadas), um processo denominado de georreferenciação.

A ortorretificação é atualmente, com a ajuda do GPS, inteiramente digital. Para uma produção de um ortofotomapa com elevada precisão, é necessário um conjunto de pontos de referência, com coordenadas conhecidas e que sejam possíveis de identificar na fotografia, ou então, uma boa base de referência ortorretificada, que apresente pontos comuns com a fotografia a ser trabalhada. De seguida, é efetuada uma translação de cada pixel da imagem para a posição geometricamente correta, relativamente a um referencial de coordenadas. Este processo designa-se por retificação diferencial e tem por base matrizes de transformação polinomial (Henriques, 2006).

Depois de obtido um ortofotomapa, com a devida escala e sistema de coordenadas, este pode ser utilizado em ambiente SIG e permite calcular áreas, distâncias e determinar posições. Além do mais, permite quantificar bidimensionalmente as mudanças geomorfológicas (possíveis de identificar fotograficamente), quando efetuada uma sobreposição de informação de outros ortofotomapas, com o mesmo sistema de coordenadas (Freitas Gomes, 2018; Henriques, 2006).

Os MDT são modelos altimétricos, que representam apenas a superfície topográfica, excluindo vegetação, edifícios e outros objetos artificiais. Por outro lado, os Modelos Digitais de Superfície (MDS), representam toda a superfície do local, apresentando valores de altimetria para objetos naturais e artificiais, como edifícios e vegetação (Freitas Gomes, 2018; Hirt, 2015; Nemmaoui *et al.*, 2019). Os MDT são muito usados para estudos de uso do solo, cheias e modelos de drenagem, aplicações geológicas e ciência planetária, enquanto os MDS são utilizados para modelagem de paisagem e cidades, telecomunicações e aplicações visuais.

1.8.7. Sistemas de Informação Geográfica

Os SIG são ferramentas informáticas que permitem adquirir, recuperar, armazenar, transformar e apresentar dados georreferenciados (Foote & Lynch, 1996; Freitas Gomes, 2018).

Desde que surgiram, nos EUA e Canadá, na década de 60, têm sido amplamente utilizados nas áreas de ordenamento do território, topografia, ambiente, agricultura, saúde pública, análise criminal, entre outros (Chang, 2017).

Nos SIG podem ser tratadas imagens de satélite, modelos numéricos de terreno, mapas, tabelas, entre outros, sendo a informação organizada em “Layers” (camadas). Os dados podem ser apresentados em dois formatos, raster e vectorial. No caso do formato raster, temos como exemplos, imagens de satélite e fotos. Os dados em formato vectorial consistem em cadeias de coordenadas e podem ser apresentados em três tipos diferentes: pontos, linhas e áreas (Vine *et al.*, 1997). Podemos afirmar que de uma maneira geral, um SIG é composto por vários componentes, que se distribuem em três níveis. A interface, componente que define o controlo e a operacionalidade do sistema, é o mais próximo do utilizador. No nível intermédio acontece o processamento dos dados, enquanto no nível mais interno, são feitos o armazenamento e a recuperação dos dados (Davis & Câmara, 2001; Freitas Gomes, 2018).

Capítulo 2 – Área de estudo

2.1. Enquadramento geográfico

A praia de Pedrinhas e Cedovém localiza-se na freguesia de Apúlia, pertencente ao concelho de Esposende, do distrito de Braga (figura 3) e apresenta uma extensão de aproximadamente 1,4 km. Esta zona pertence ao setor compreendido entre o rio Minho e o canhão da Nazaré e ao POC de Caminha - Espinho. Está inserida na plataforma marítima do Minho Litoral e também no Parque Natural do Litoral Norte (PNLN), que se estende por cerca de 16 km entre a foz do rio Neiva e o sul de Apúlia, sendo administrado pelo município de Esposende.

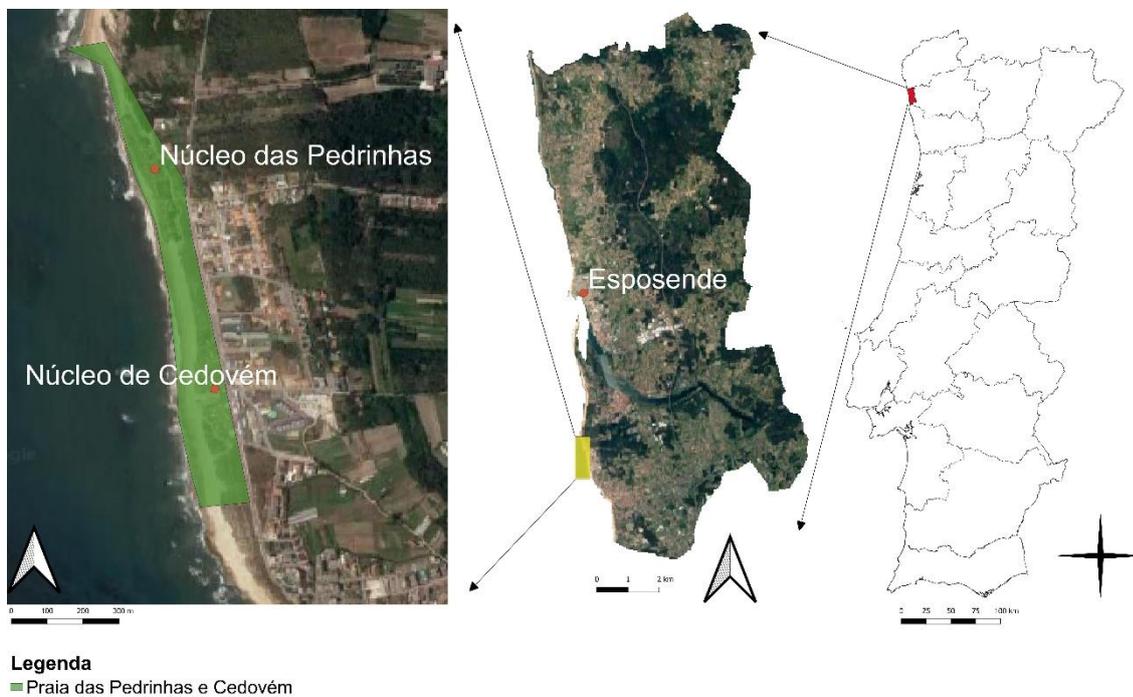


Figura 3 - Localização da praia de Pedrinhas e Cedovém. Sistema de Referências de Coordenadas ETRS89/Portugal TM06 - ESPG: 3763.

Este local está associado a uma forte componente piscatória, destacando-se a presença dos dois bairros de pescadores que dão o nome à praia. No núcleo de Pedrinhas, atualmente, as habitações são maioritariamente de alojamento local ou de segunda habitação. Neste núcleo, devido ao interesse histórico e cultural que as habitações representam, é prevista a criação de um espaço museológico (Henriques *et al.*, 2020).

Por outro lado, no núcleo de Cedovém, as habitações são ainda de primeira habitação. É importante referir ainda, a presença de alguns restaurantes neste núcleo, bastante procurados, principalmente nos

meses de Verão. A transformação ao longo dos anos, dos abrigos dos pescadores para habitações de carácter permanente, aconteceu de maneira ilegal (Henriques *et al.*, 2020).

Além da componente natural, outros fatores acrescentam importância ao local, como o turismo, a economia e a presença de bens e pessoas.

2.2. Enquadramento geológico

A área de estudo é abrangida pela folha 5C (Barcelos) à escala 1:50 000, e pela folha 1 à escala 1:200000 (figura 4), da Carta Geológica de Portugal, pertencendo este sector à Zona Centro Ibérica.

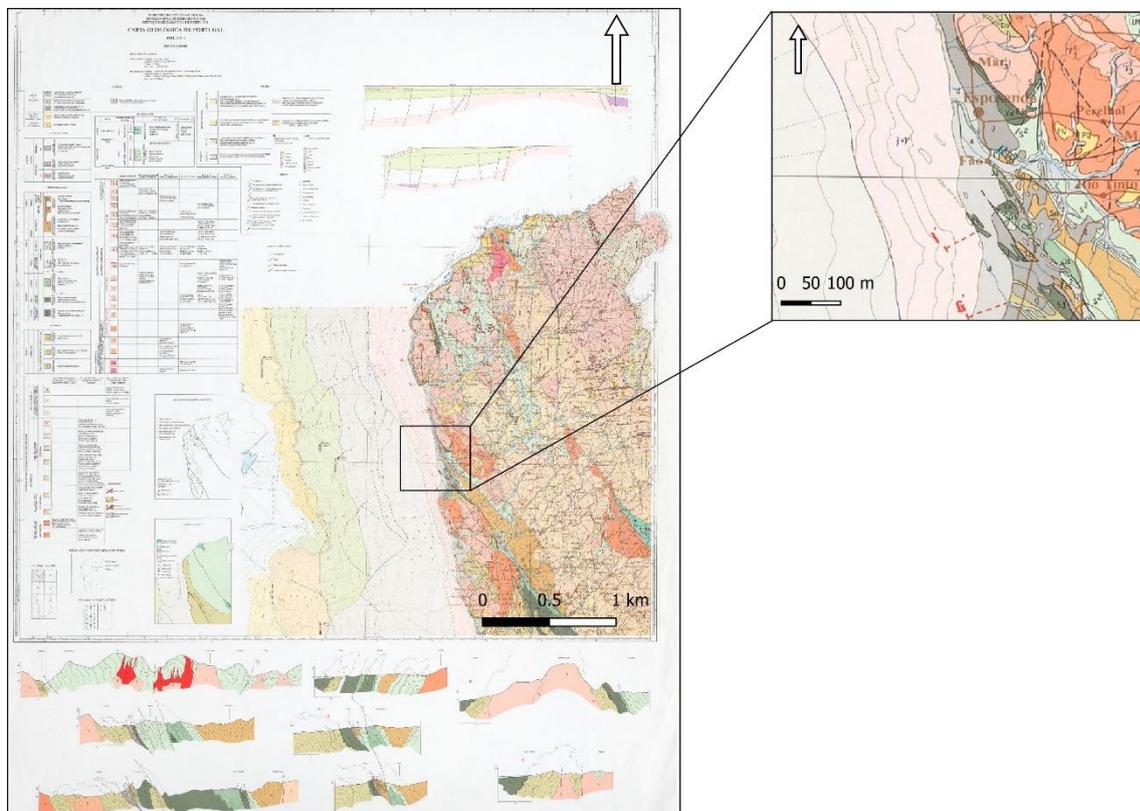


Figura 4 - Excerto da folha 1 da Carta Geológica de Portugal, na escala 1:200000, com a respetiva ampliação e localização da área de estudo (Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG)).

O substrato rochoso do setor das Pedinhas/Cedovém é constituído por rochas meta-sedimentares da era Paleozóica, predominantemente do Ordovícico. Os quartzitos, mais resistentes à erosão, afloram por todo o sector, tanto na zona emersa como imersa, sendo popularmente conhecidos como “Cavalos de Fão”. Sobre o substrato rochoso, ocorrem ainda depósitos sedimentares mais antigos, relacionados com as linhas de água primitivas, bem como depósitos marinhos mais antigos que os da atualidade, que poderão

estar ligados a episódios transgressivos ocorridos no passado. É de destacar também, a ocorrência de depósitos mais recentes, provenientes da atividade fluvial do rio Cávado, e de depósitos arenosos de dunas fósseis e dunas atuais, além de pequenos depósitos de seixos (Henriques *et al.*, 2020).

2.3. Caracterização geomorfológica

Geomorfologicamente, a parte emersa do setor das Pedrinhas/Cedovém é caracterizada por praias baixas e arenosas, que são sucedidas de dunas em que a cota máxima situa-se entre os 10 e os 15 m (figura 5a) (Henriques *et al.*, 2020). Atualmente, é visível a presença em todo o setor de uma arriba de erosão de grande declive (figura 5b). Além disso, pode ocorrer ainda o aparecimento de seixos (figura 6).

À medida que nos deslocamos para o interior, é perceptível o aplanamento do terreno, não apresentando grandes diferenças de altitude (figura 7).

São visíveis corredores eólicos, potenciados por ação antrópica, em que são identificadas dunas com tendências migratórias (figura 8).

Nesta praia existem pequenos edifícios em risco iminente de derrocada (figura 9), provavelmente devido à ocorrência de episódios de tempestade.

As paliçadas existentes no local, para tentar impedir ou atrasar a migração das dunas, encontram-se parcialmente (figura 10a), e, nalguns casos, quase totalmente cobertas por areia (figura 10b).

A área de estudo apresenta alguns pontos, nomeadamente no núcleo das Pedrinhas, em que a distância da base da pequena elevação onde estão situadas as habitações à linha de rebentação das ondas é de pouco mais de 15 metros. É possível identificar tentativas de parar o avanço do mar, como a colocação de sacos de areia e paliçadas de um tamanho significativo, nos dois núcleos habitacionais (figuras 11a e 11b), e ainda a construção de um enrocamento longilitoral no núcleo das Pedrinhas (figura 12), para proteção das habitações, dando origem a uma forma em promontório.



Figura 5 - Aspeto da praia de Pedrinhas e Cedovém: (a) praia baixa e arenosa, seguida de dunas; (b) perspectiva da arriba de erosão.



Figura 6 - Aglomerado de seixos registado na zona sul da praia de Pedrinhas e Cedovém.



Figura 7 - Zona mais interior, a sul do núcleo de Cedovém.



Figura 8 - Dunas migratórias, cobrindo o passadiço de acesso.



Figura 9 - Pequeno edifício em risco de derrocada.



Figura 10 - Paliçadas usadas para combater a migração das dunas: (a) parcialmente cobertas; (b) cobertas quase na sua totalidade.

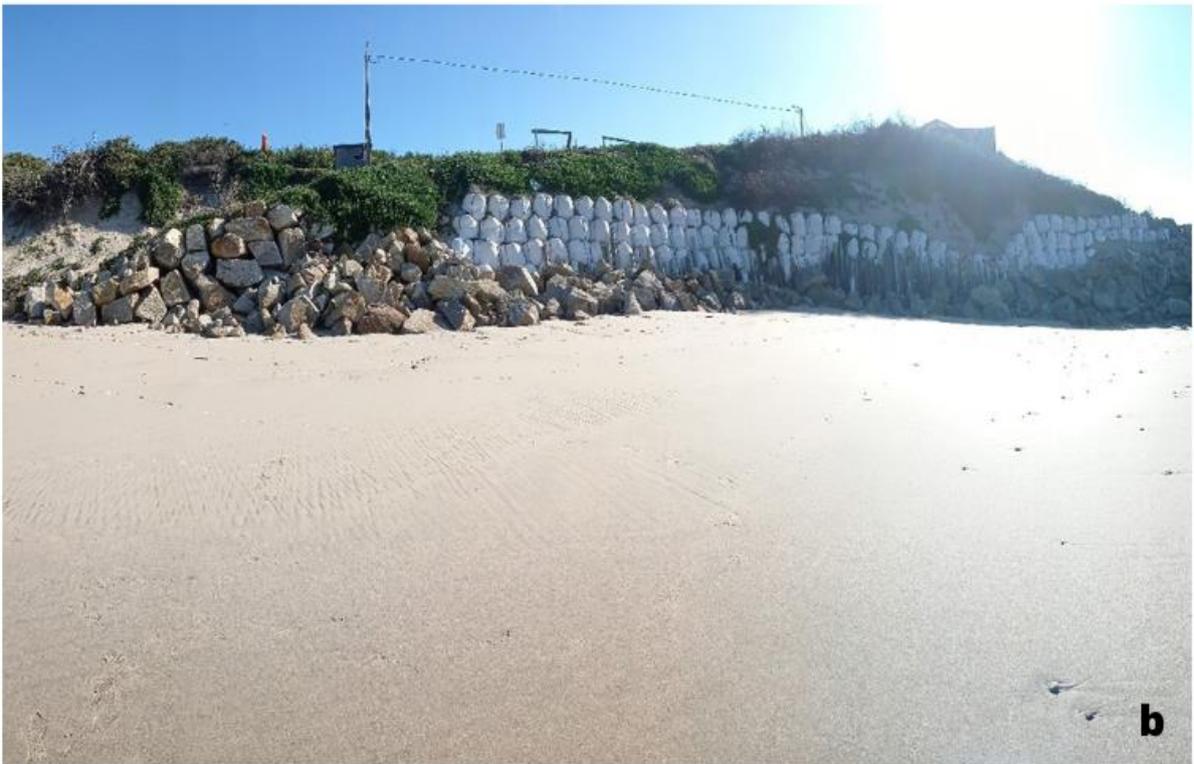


Figura 11 - Tentativas de parar o avanço do mar, desde paliçadas, sacos de areia e rochas: (a) núcleo de Cedovém; (b) ponta norte do núcleo das Pedrinhas.



Figura 12 - Enrocamento longilitoral do núcleo das Pedrinhas.

2.4. Flora

Em zonas de praia marcam presença, principalmente, plantas halófitas, ou seja, capazes de subsistir em solos com elevado teor de sal.

Na zona em estudo, habita maioritariamente a vegetação rasteira ou de pequeno porte, representada por diferentes espécies de plantas, algumas das quais autóctones e comuns dos ambientes costeiros portugueses. Exemplo dessas espécies são o cardo-marítimo (*Eryngium maritimum*) (figura 13a), a granza-da-praia (*Crucianella marítima*) (figura 13b), a madorneira (*Artemisia campestris ssp. marítima*) (figura 14a), a perpétua-das-areias (*Helichrysum italicum*) (figura 14b) e o mentastro (*Mentha suaveolens*) (figura 14c).



Figura 13 - Flora autóctone registada na área de estudo: (a) cardo-marítimo (*Eryngium maritimum*); (b) granza-da-praia (*Crucianella maritima*).



Figura 14 - Flora autóctone registada na área de estudo: (a) madorneira (*Artemisia campestris* spp. *maritima*); (b) perpétua-das-areias (*Helichrysum italicum*); (c) mentastro (*Mentha suaveolens*).

Apesar da vegetação autóctone estar presente, o local também apresenta algumas espécies invasoras, desde uma elevada quantidade de indivíduos de chorão-das-praias (*Carpobrotus edulis*) (figura 15a), exemplares isolados de *Opuntia monacanta* (figura 15b) e de acácia-de-espigas (*Acacia longifolia*) (figura 15c), principalmente na parte norte. Esta situação é preocupante, pois estas espécies formam povoamentos bastante densos, o que impede o desenvolvimento de vegetação nativa, resultando na perda de diversidade biológica. Além disso, no caso das acácias, a sua presença aumenta ainda o risco de incêndio no local, devido ao facto de serem plantas lenhosas.



Figura 15 - Flora invasora registada na área de estudo: (a) chorão-das-praias (*Carpobrotus edulis*); (b) *Opuntia monacantha*; (c) Povoamento denso de acácia-de-espigas (*Acacia longifolia*).

2.5. Fauna

O local, assim como o resto do litoral de Esposende, apresenta uma interessante riqueza faunística. Na primeira linha vegetal, sujeita à submersão pela água do mar e enterramento pela areia, a diversidade de animais é pobre. Estão presentes detritívoros comuns das zonas de praia, como a pulga-da-areia (*Talitrus saltator*) ou o isópode *Sphaeroma serratum*, que se alimentam da enorme quantidade de detritos orgânicos, atraindo também aves de pequeno porte.

Mais para o interior, fora do alcance das vagas, vários pequenos insetos estão presentes, alimentando-se dos detritos orgânicos depositados pelo vento. É também o local de repouso de aves como os pilritos e borrelhos (que inclusive nidificam nesta zona).

Para lá do topo da duna, a grande abundância de espécies vegetais promove uma abundância de espécies de gafanhotos, larvas de borboletas e caracóis (figura 16). Além disso, esta zona é frequentada por diferentes espécies de gaivotas, aves limícolas como o borrelho-de-coleira-interrompida (*Charadrius alexandrinus*), símbolo do PNLN e outras aves marinhas. Também estão presentes espécies de anfíbios,

como o sapo-de-unha-negra (*Pelobates cultripes*), um animal de hábitos noturnos e comum no concelho de Esposende, que vê o seu habitat destruído pela construção de habitações e recuo da linha costeira. Por último, habitam espécies de maior porte, como o sardão (*Timon lepidus*) e o coelho-bravo (*Oryctolagus cuniculus*). Devido às condições difíceis do meio dunar e à presença de predadores, muitos destes animais são noturnos, revelando um panorama bem diferente durante a noite, que durante o dia não é possível perceber (Gomes *et al.*, 2002).

A erosão costeira pode ter um impacto negativo em todo este conjunto de espécies. As consequências da erosão costeira que recebem mais atenção, são as que, por razões óbvias, interferem com as pessoas e os bens. Todavia, a perda de habitat é também um sério problema, especialmente quando afeta espécies icónicas do PNLN como o borrelho-de-coleira-interrompida (*Charadrius alexandrinus*).



Figura 16 - Indivíduos da espécie caracol-das-cervejarias (*Theba pisana*) registados na área de estudo.

2.6. Fotografia aérea histórica

Para a zona de estudo, existe um interessante arquivo de fotografia aérea antiga, que, além da sua importância como registo histórico, pode ser útil para efetuar uma comparação da evolução do local ao longo das últimas décadas. Estão disponíveis registos provenientes do IGeoE e Direção-Geral do Território (DGT), anteriores (figura 17) e posteriores (figura 18) à construção dos três esporões da zona de Ofir, a

barlamar do local de estudo. O esporão das Pedrinhas, situado mais a sul e construído no ano de 1986, é visível nas fotografias aéreas mais recentes.

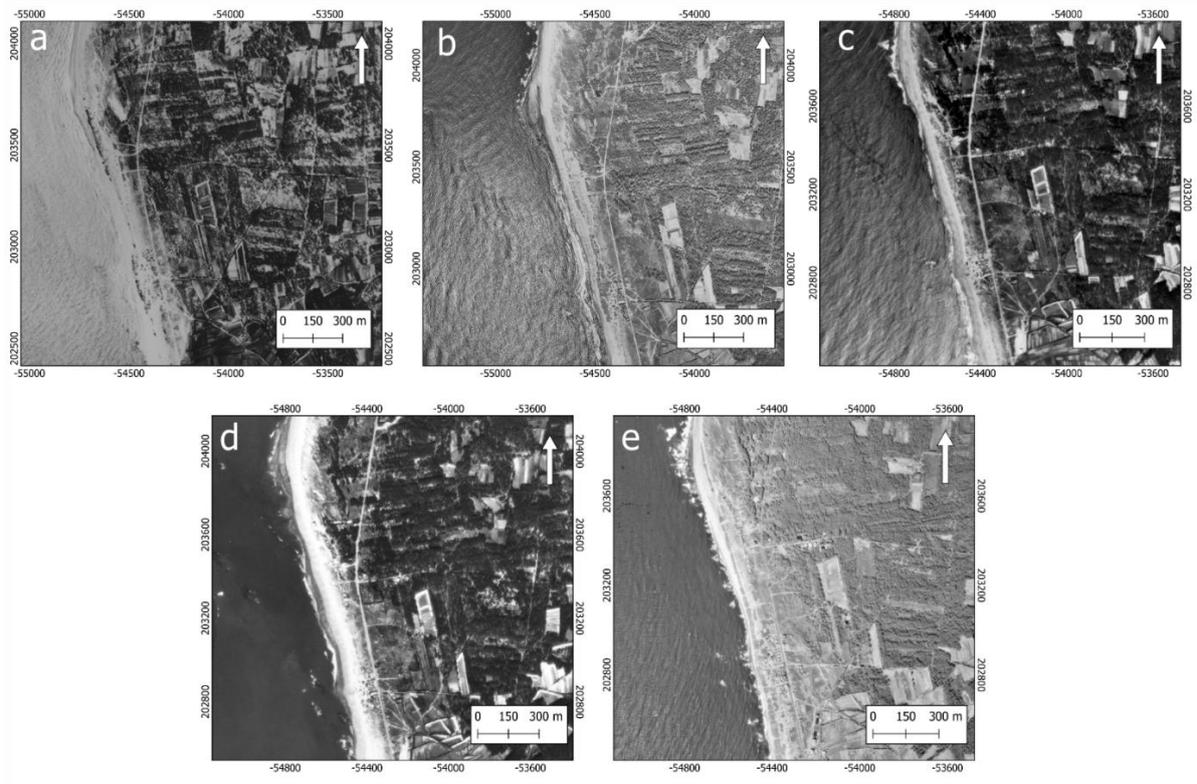


Figura 17 - Fotografia aérea histórica do local de estudo: (a) 1958; (b) 1965; (c) 1973; (d) 1974; (e) 1983.

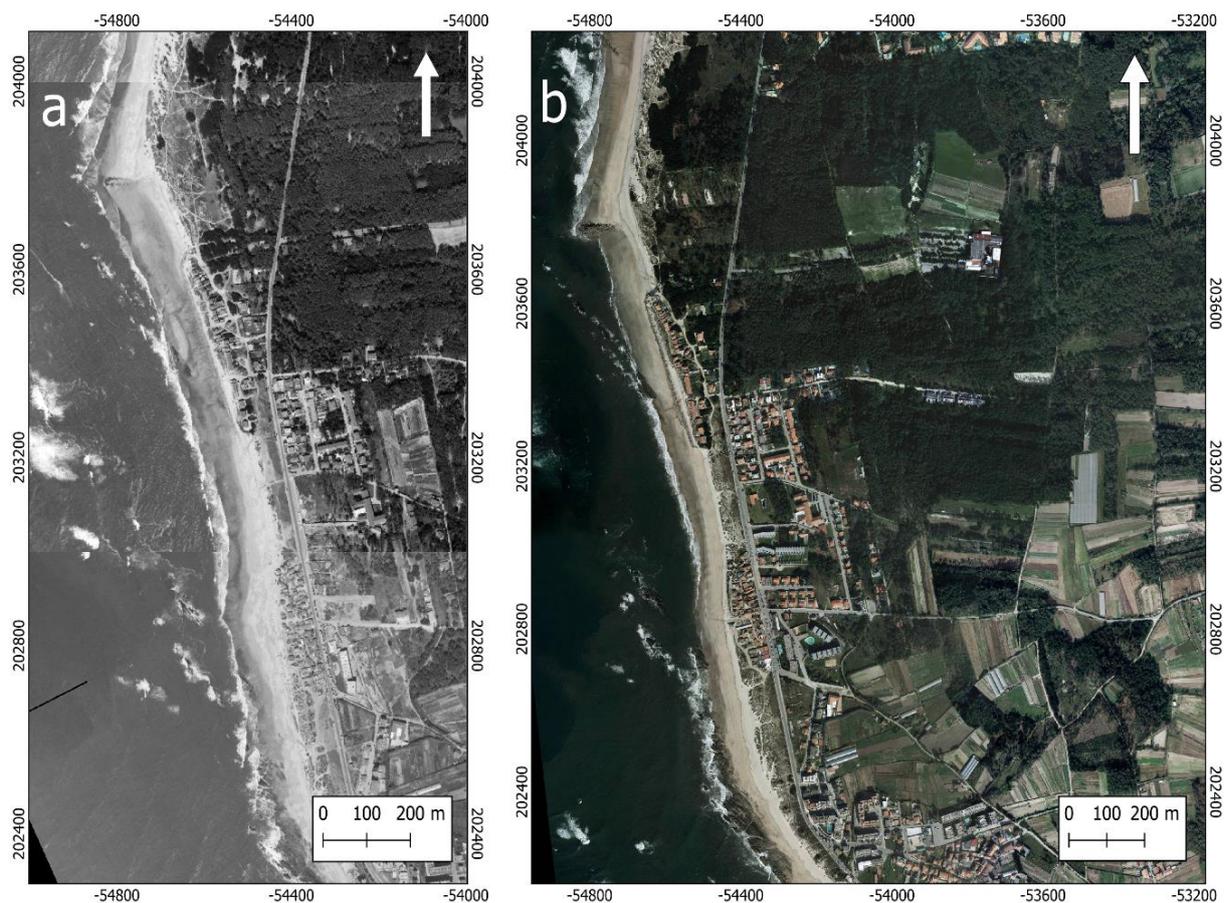


Figura 18 - Fotografia aérea histórica do local de estudo: (a) 1996; (b) 2014.

Embora a fotografia aérea exista, a possibilidade de a usar para a extração de modelos altimétricos compatíveis com a precisão de georreferenciação e com a resolução das fotografias obtidas por VANT é limitada. Os modelos a obter por este processo podiam conduzir a valores pouco precisos de balanço sedimentar. Deste modo, optou-se por não utilizar a fotografia aérea para fins de balanço sedimentar.

Ainda assim, a fotografia aérea histórica pode ser importante para uma visualização, ainda que superficial, sobre a evolução do local. Neste caso, é possível observar as mudanças ocorridas na praia ao longo das décadas, como a evolução da linha de vegetação, o avanço do mar em direção aos dois núcleos habitacionais e a influência da construção do esporão.

Capítulo 3 – Materiais e métodos

3.1. Materiais

No âmbito deste trabalho foram utilizadas as seguintes ferramentas tecnológicas:

- QGIS;
- *Agisoft Metashape*;
- ArcGis (DSAS);
- Fotografia área histórica;
- Fotografia aérea obtida por VANT;
- MDS LiDAR (APA), MDS LiDAR (Infoportugal), MDS Cosmo e VANT;
- Acer Aspire ES 15.

3.1.1. QGIS

O QGIS é um SIG de código aberto, criado em 2002, sendo um software oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) (QGIS, 2022).

É compatível com os sistemas operativos Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android. Suporta vários formatos raster, vetoriais e de dados e apresenta inúmeras funcionalidades, podendo ser acrescentadas outras através de *plugins*. Neste programa, é possível visualizar, gerir, editar e analisar dados e ainda produzir mapas para impressão.

3.2. Metodologia

3.2.1. Modelos Digitais de Superfície

O MDS do ano de 2021 foi processado pelo Professor Doutor Renato Henriques, a partir do levantamento da Infoportugal para a empresa Território XXI. Todos os dados planimétricos, altimétricos e fotografias aéreas estão no sistema PT-TM06/ETRS89 (EPSG:3763).

O MDS do ano de 2011 foi o obtido a partir da APA. Contudo, foi processado pelo Professor Doutor Renato Henriques.

O MDS de 2018 também foi obtido a partir da APA, do Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental (COSMO). Este modelo teve de ser corrigido, pois a APA mediu dois metros acima do nível do mar, por ter sido utilizado o zero hidrográfico em vez do zero topográfico. Neste caso, foi aplicada uma subtração de dois metros, para ficar coerente com os modelos de 2011 e 2021.

A partir da recolha fotográfica, pode-se proceder ao processamento dos MDS, nomeadamente no software *Agisoft Metashape*. Para a obtenção de MDS é necessário a criação de modelos 3D pelos seguintes passos:

1. Adicionar as fotografias aéreas;
2. Criação de “máscaras”;
3. Alinhamento das fotografias;
4. Criação de “nuvem densa de pontos”;
5. Geração de modelo poligonal com base na informação da nuvem densa de pontos (“Mesh”);
6. Texturização do modelo.

Seguidamente, a partir da nuvem de pontos, são criados os MDS e ortomosaicos e colocados os parâmetros de processamento.

3.2.2. Cálculo de volumes e variação altimétrica

O primeiro passo para o cálculo de volumes é a criação de polígonos. No software QGIS, utilizando um MDS importado como “raster”, os polígonos deverão ser criados sob a forma de vectorial. Para a criação do polígono, é ativado o botão “Toggle Editing” e em seguida o “Add Polygon Feature”.

Depois, é utilizado o *plugin* “Volume Calculation Tool” (figura 19), para calcular o volume em diferentes épocas, que, depois de obtidos, permitem calcular o balanço sedimentar e posteriormente o volume relativo, sendo necessária a área do polígono para calcular este último. Estes três últimos parâmetros são calculados utilizando a “Field Calculator” (figura 20).

O módulo “Raster Calculator” foi utilizado para a produção dos mapas de variação altimétrica, através do cálculo da diferença de cota entre os diferentes MDS utilizados (figura 21).

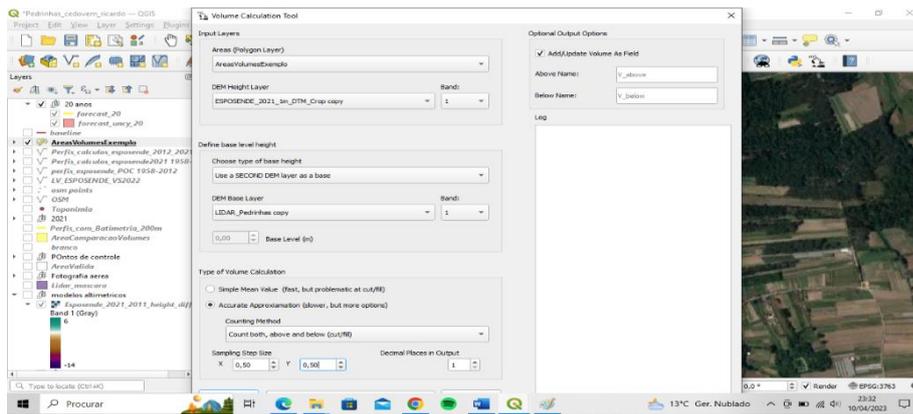


Figura 19 - Cálculo de volume utilizando o *plugin* "Volume Calculation Tool" no programa QGIS.

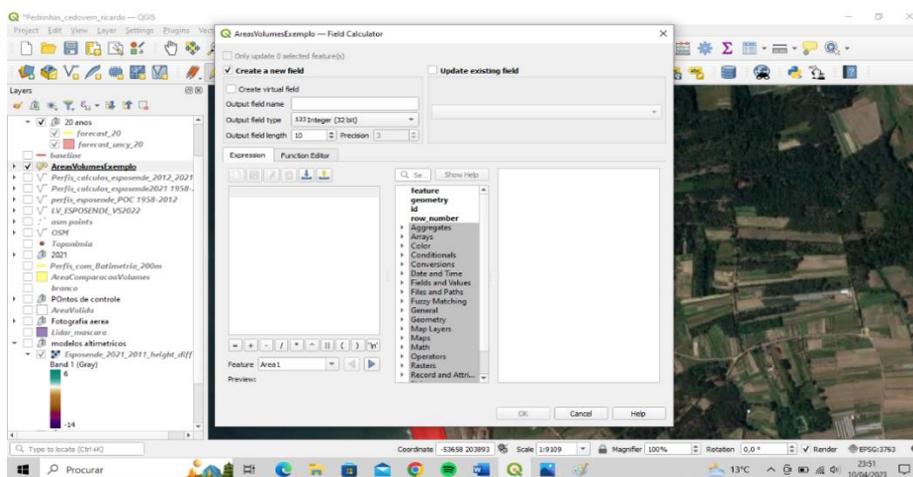


Figura 20 - Janela da "Field Calculator" no programa QGIS.

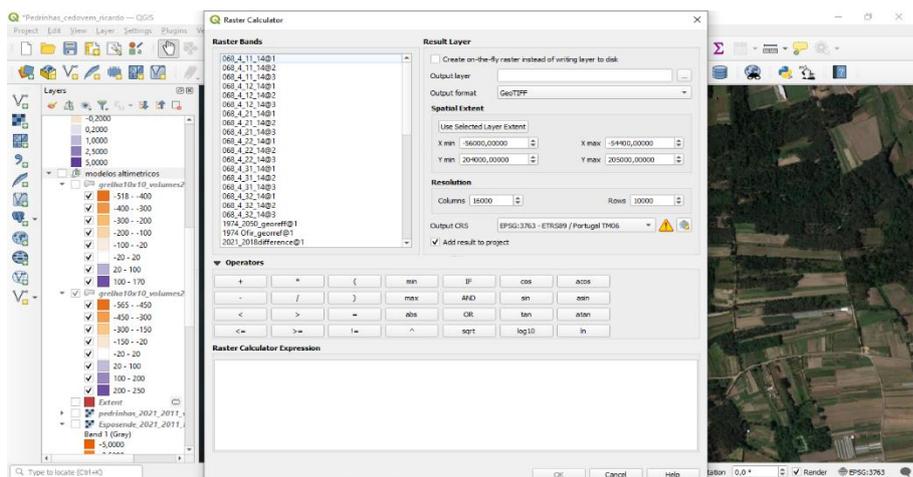


Figura 21 - Janela da "Raster Calculator" no programa QGIS.

3.2.3. Criação de grelhas

A criação de grelhas é um processo relativamente simples no QGIS. Em primeiro lugar são selecionados os botões “Vector”, seguindo-se “Research Tools” e por fim “Create Grid”. Finalmente, aparece a janela onde são selecionadas as características da grelha (figura 22).

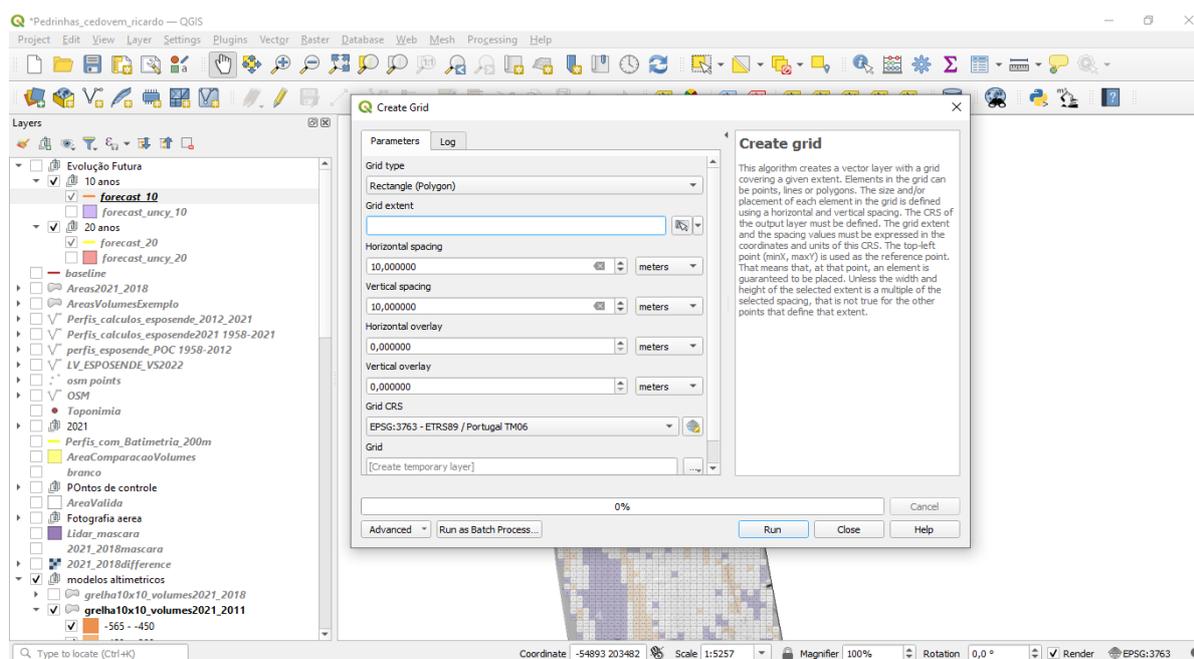


Figura 22 - Janela de criação de uma grelha volumétrica no programa QGIS.

3.2.4. Linha de vegetação

Utilizando o software QGIS, a linha de vegetação pode ser extraída através do modo vectorial, por decalque manual, sobre cada ortofotomapa correspondente, sendo cada linha individual identificada visualmente.

Assim, cada linha obtida representa a posição histórica desse indicador (linha de vegetação), no instante em que a fotografia foi tirada (figura 23).

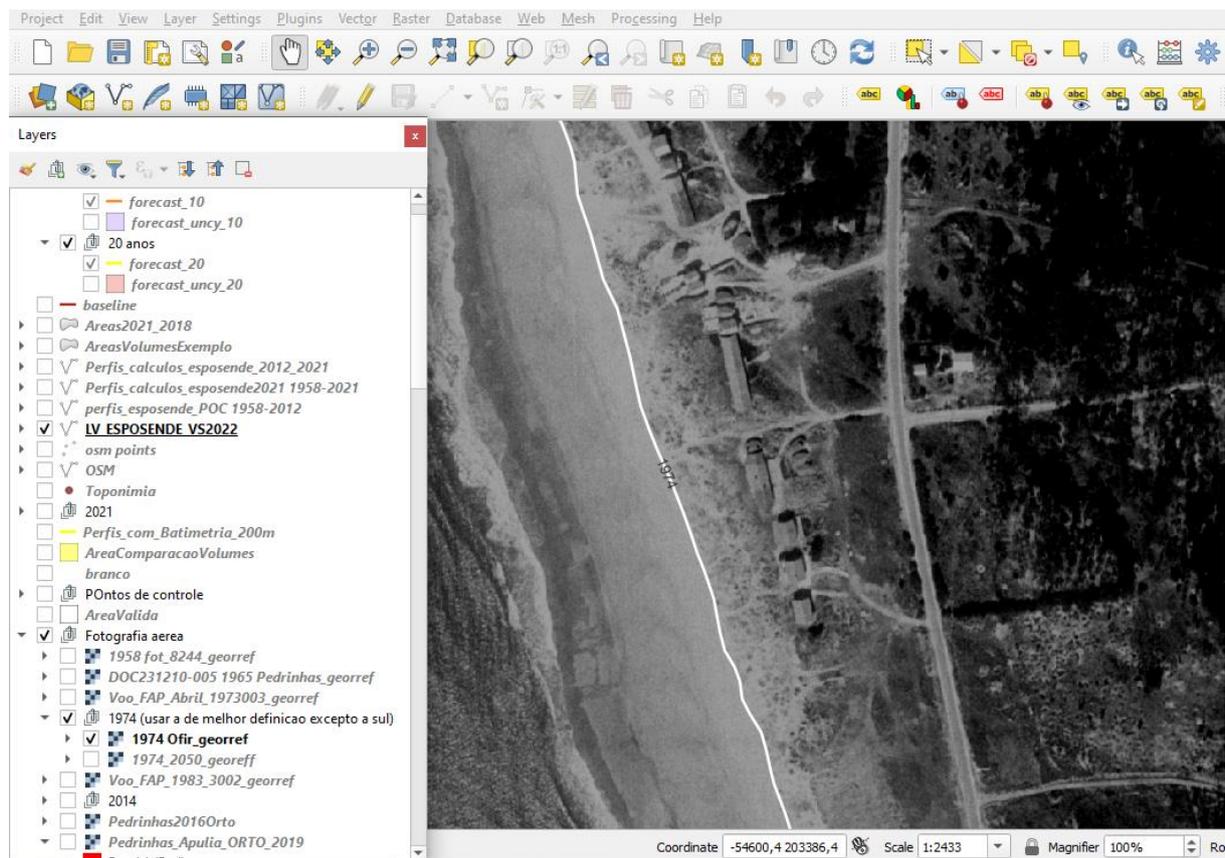


Figura 23 - Linha de vegetação criada para o ano de 1974 no programa QGIS.

3.2.5. Perfis de projeção e evolução futura da linha de vegetação

Os perfis de projeção são criados através do programa ArcGis. Mais especificamente, é utilizado o módulo *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS). Para uma melhor compreensão, a metodologia será explicada por passos, apresentando as opções e tarefas entre parêntesis:

1. Importar dados de linhas costeiras e da linha de base (ou criar uma) e preencher as suas tabelas de atributos;
2. Efetuar as configurações para a linha de base (localização; orientação) e para a linha de costa (parâmetros de interseção; parâmetros de viés) (figura 24);

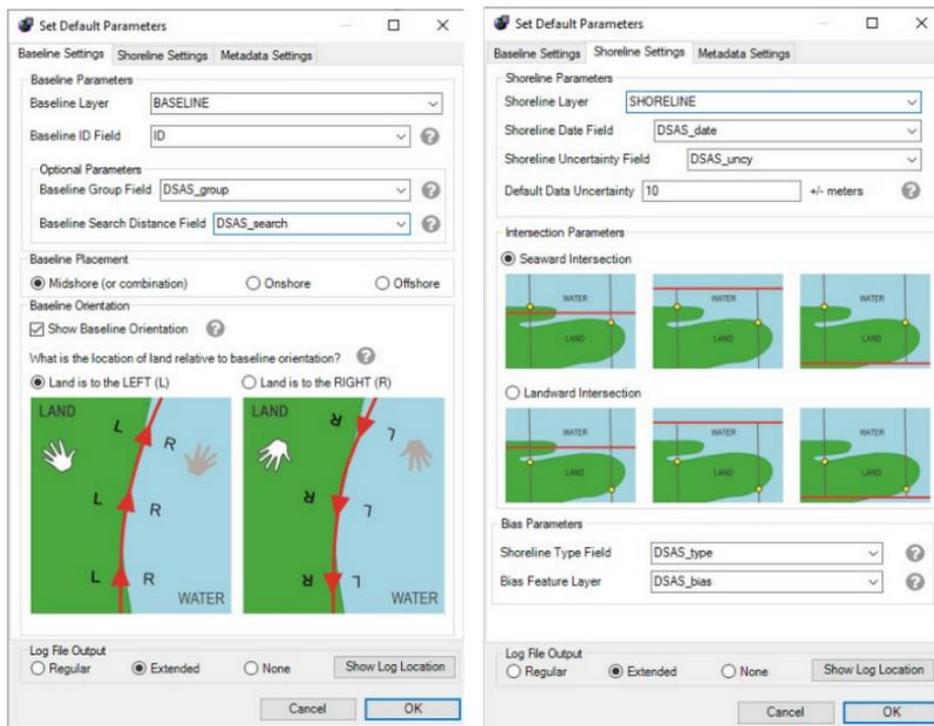


Figura 24 - Configurações para a linha de base (à esquerda) e para a linha de costa (à direita) no módulo DSAS do programa ArcGis.

3. Efetuar as configurações de metadados (informações gerais e de contacto).
4. Gerar transectos e configurar (distância máxima; espaço entre transectos; distância de “smoothing”) (figura 25).

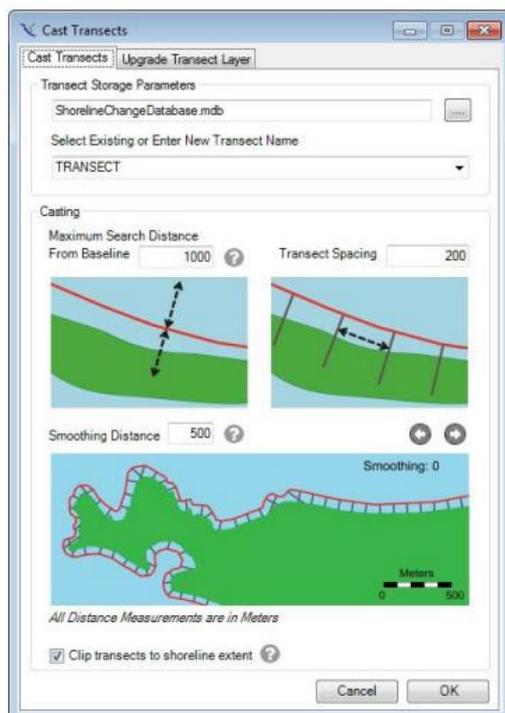


Figura 25 – Configurações dos transectos no módulo DSAS do programa ArcGis.

5. Editar transectos (opcional);
6. Calcular estatísticas de mudança (especificar o que calcular como o *Shoreline Change Envelope* (SCE), *Net Shoreline Movement* (NSM), *End Point Rate* (EPR), *Linear Regression Rate* (LRR) e *Weighted Linear Regression* (WLR); especificar intervalo de confiança; limite de interseção da linha costeira; visualização da taxa de saída; criar relatório resumido);
7. Visualização de dados e opções de exibição;
8. Evolução futura da linha de costa (previsão para 10 e 20 anos (“polyline and point” da posição potencial da linha de costa); banda de incerteza).

Capítulo 4 – Resultados

No presente capítulo, apresentam-se os resultados obtidos e a sua respetiva discussão. Inicialmente serão apresentados os MDS, seguindo-se os mapas de variação altimétrica e grelhas de variação volumétrica, comparação de áreas relativamente à variação de volume de areia, evolução da linha de vegetação até hoje bem como os perfis de projeção relacionados e, finalmente, a evolução futura do local.

4.1. Modelos Digitais de Superfície

Foram elaborados os MDS para os anos de 2011 (figuras 26a e 26b), 2018 (figuras 27a e 27b) e 2021 (figuras 28a e 28b).

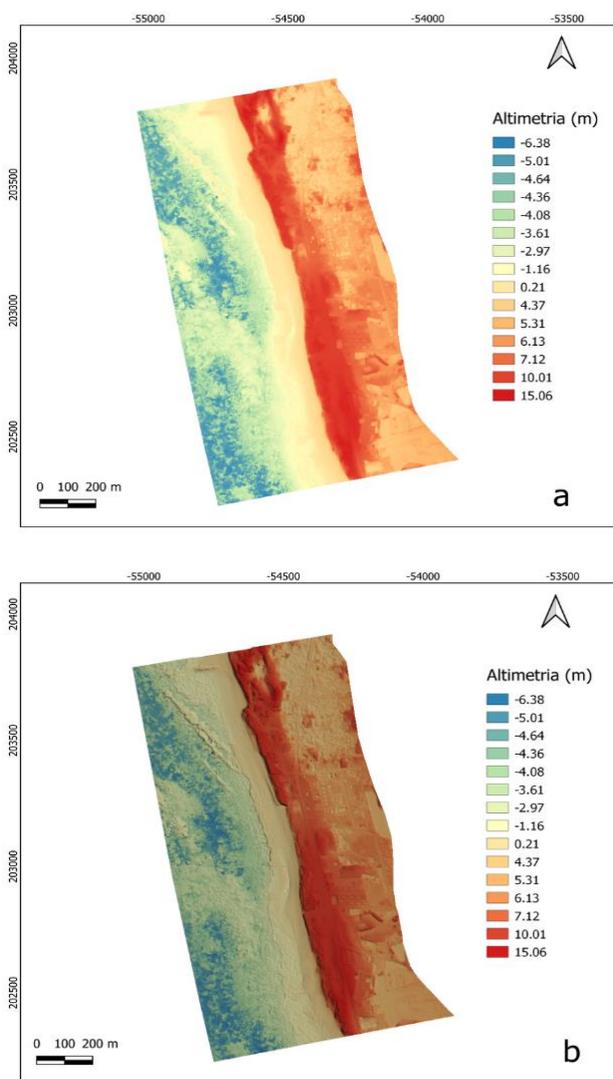


Figura 26 - (a) Modelo Digital de Superfície; (b) Modelo Digital de Superfície com *hillshade*, referentes ao ano de 2011.

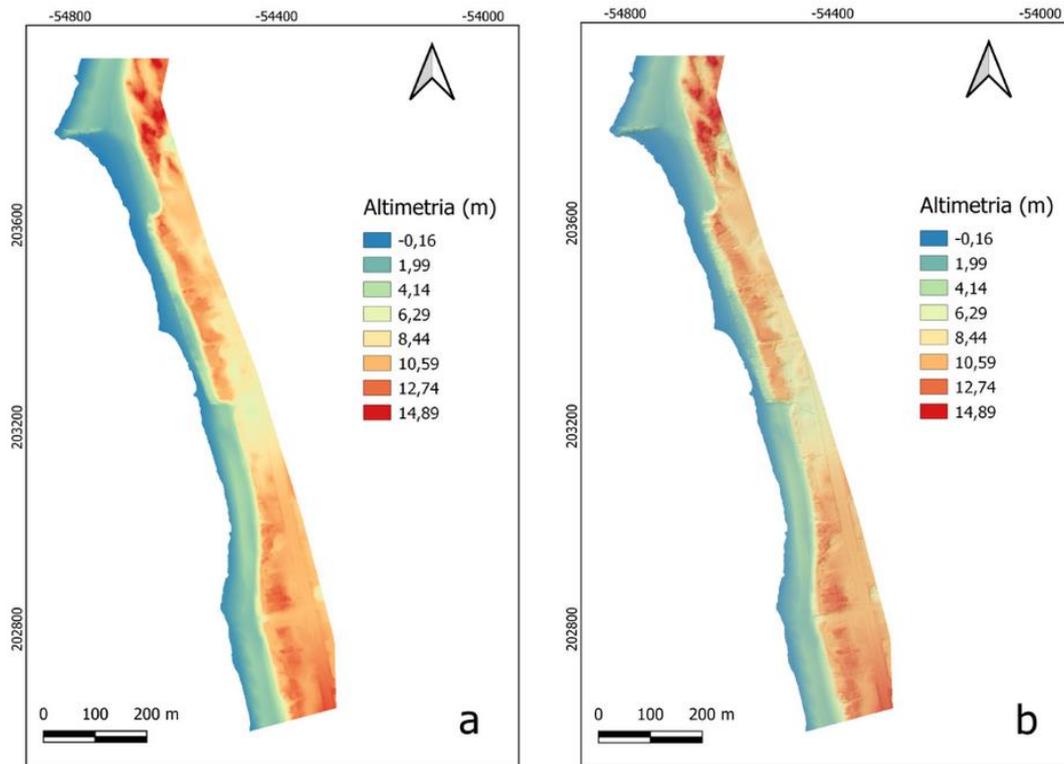


Figura 27 - (a) Modelo Digital de Superfície; (b) Modelo Digital de Superfície com *hillshade*, referentes ao levantamento de 2018.

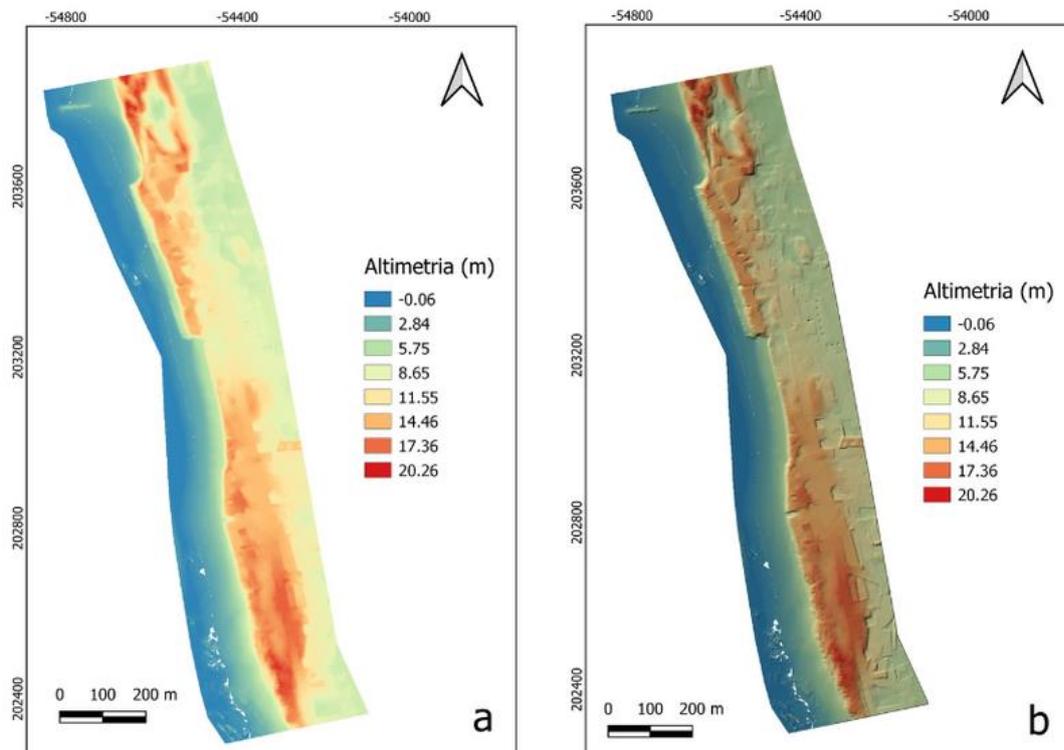


Figura 28 - (a) Modelo Digital de Superfície; (b) Modelo Digital de Superfície com *hillshade*, referentes ao levantamento de 2021.

4.2. Variação altimétrica e de volumes

Foram produzidos dois mapas de variação altimétrica do local de estudo, entre o ano de 2011 e 2021 (figura 29) e entre o ano de 2018 e 2021 (figura 32). Além disso, foram criadas grelhas de balanço sedimentar para os mesmos intervalos de tempo (figuras 30, 31, 33 e 34).

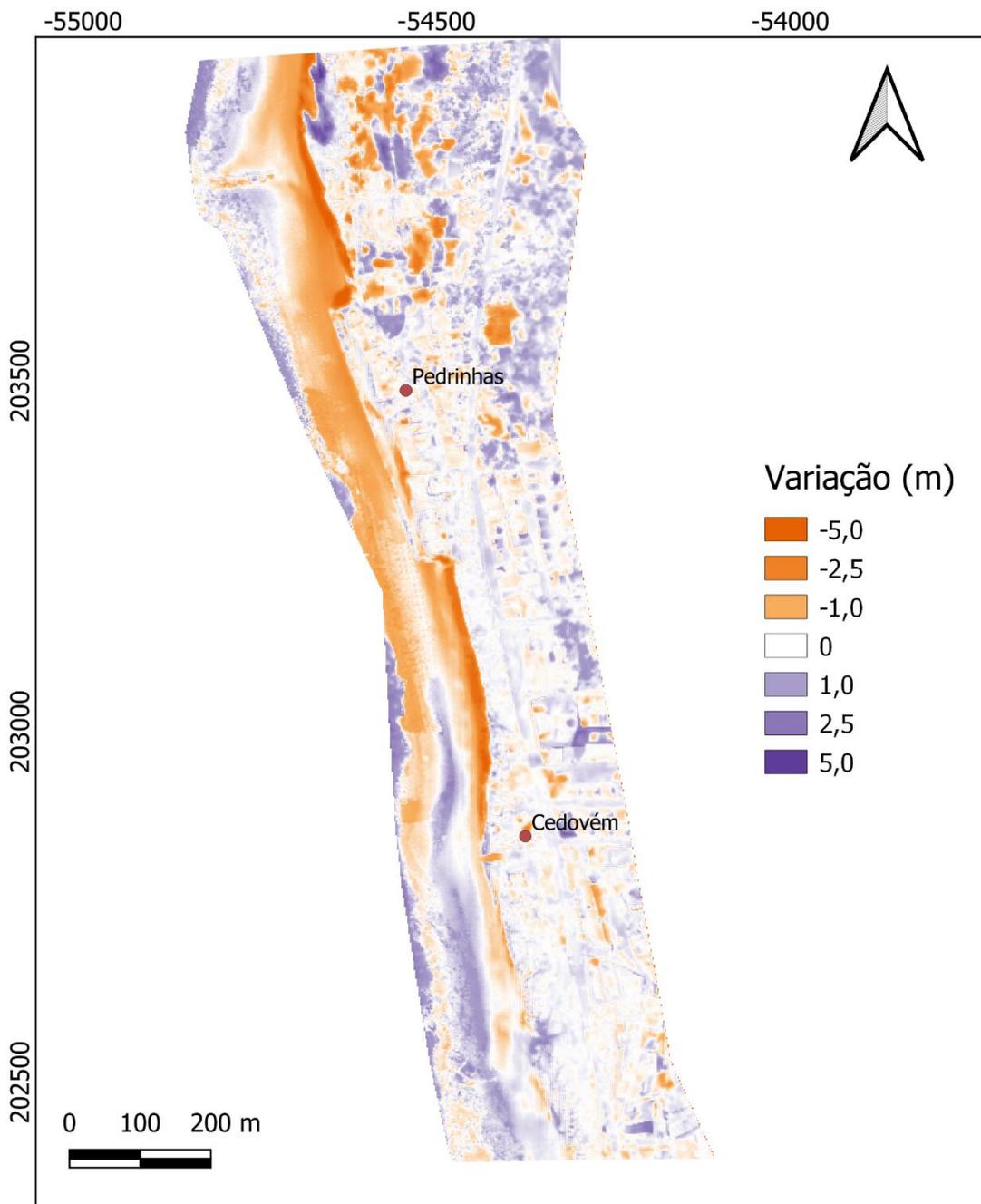


Figura 29 - Mapa de variação altimétrica entre o ano de 2011 e 2021.

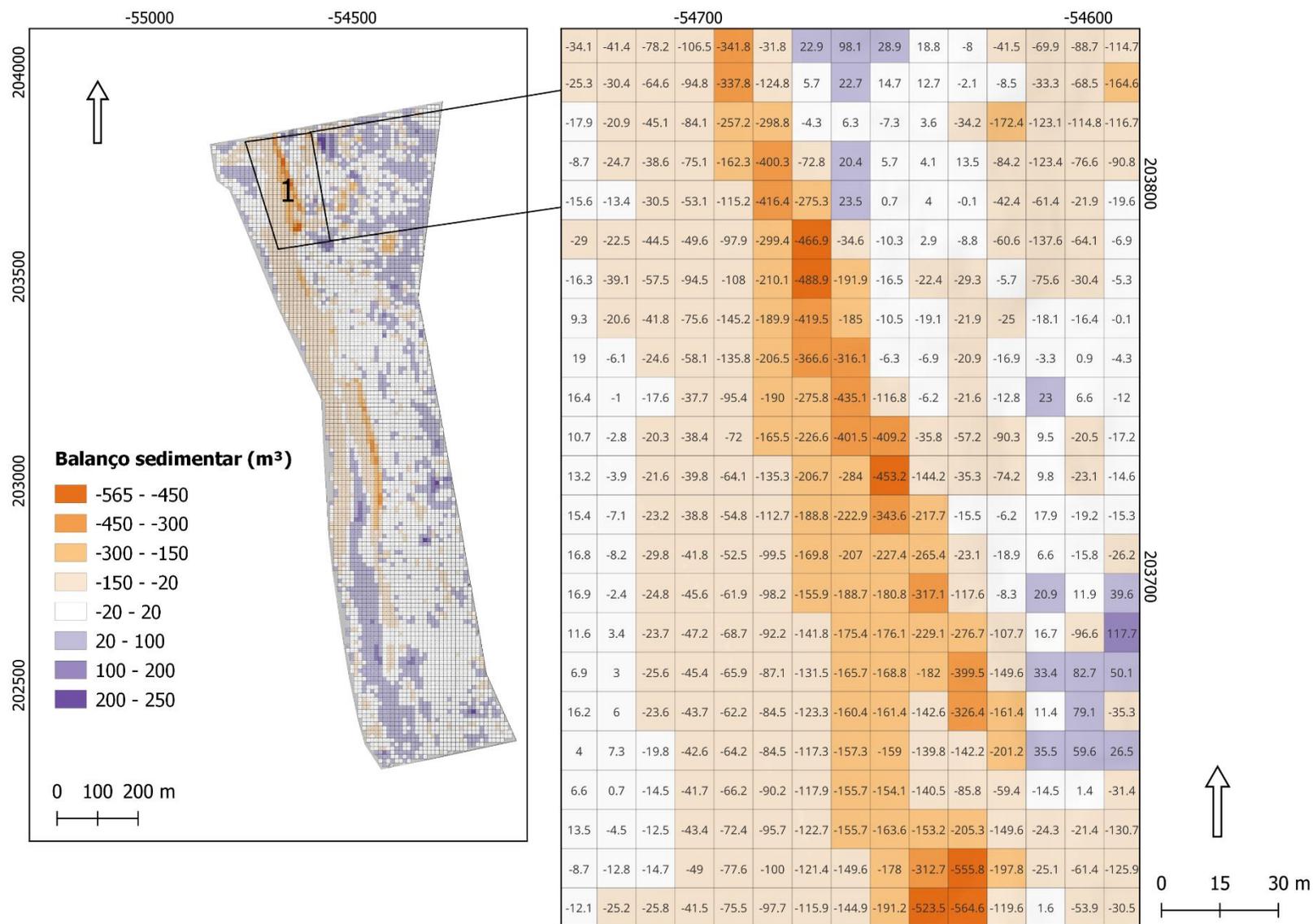


Figura 30 - Grelha de balanço sedimentar para o intervalo de tempo 2011-2021, com respectiva ampliação de uma área de interesse.

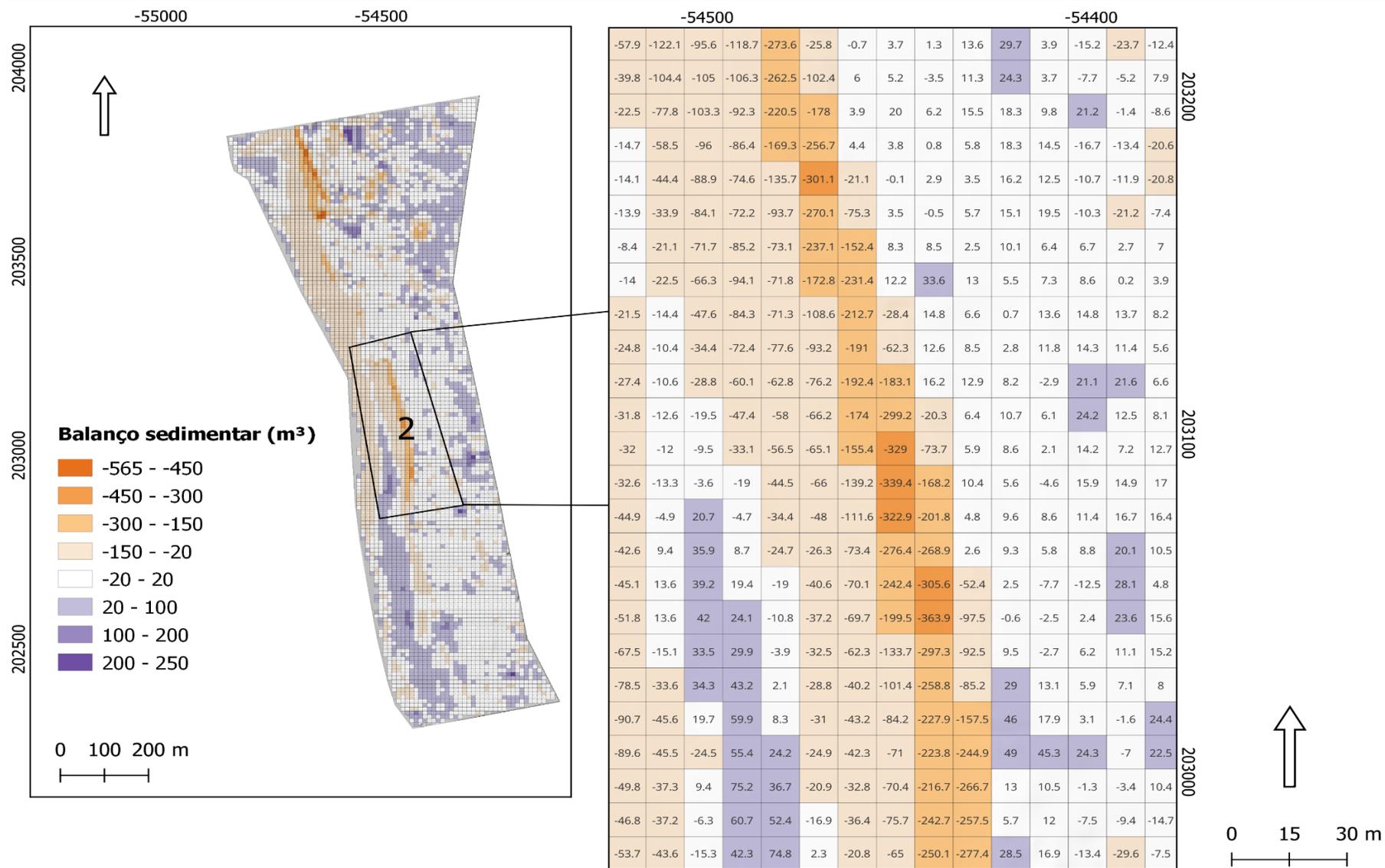


Figura 31 - Grelha de balanço sedimentar para o intervalo de tempo 2011-2021, com respectiva ampliação de uma área de interesse.

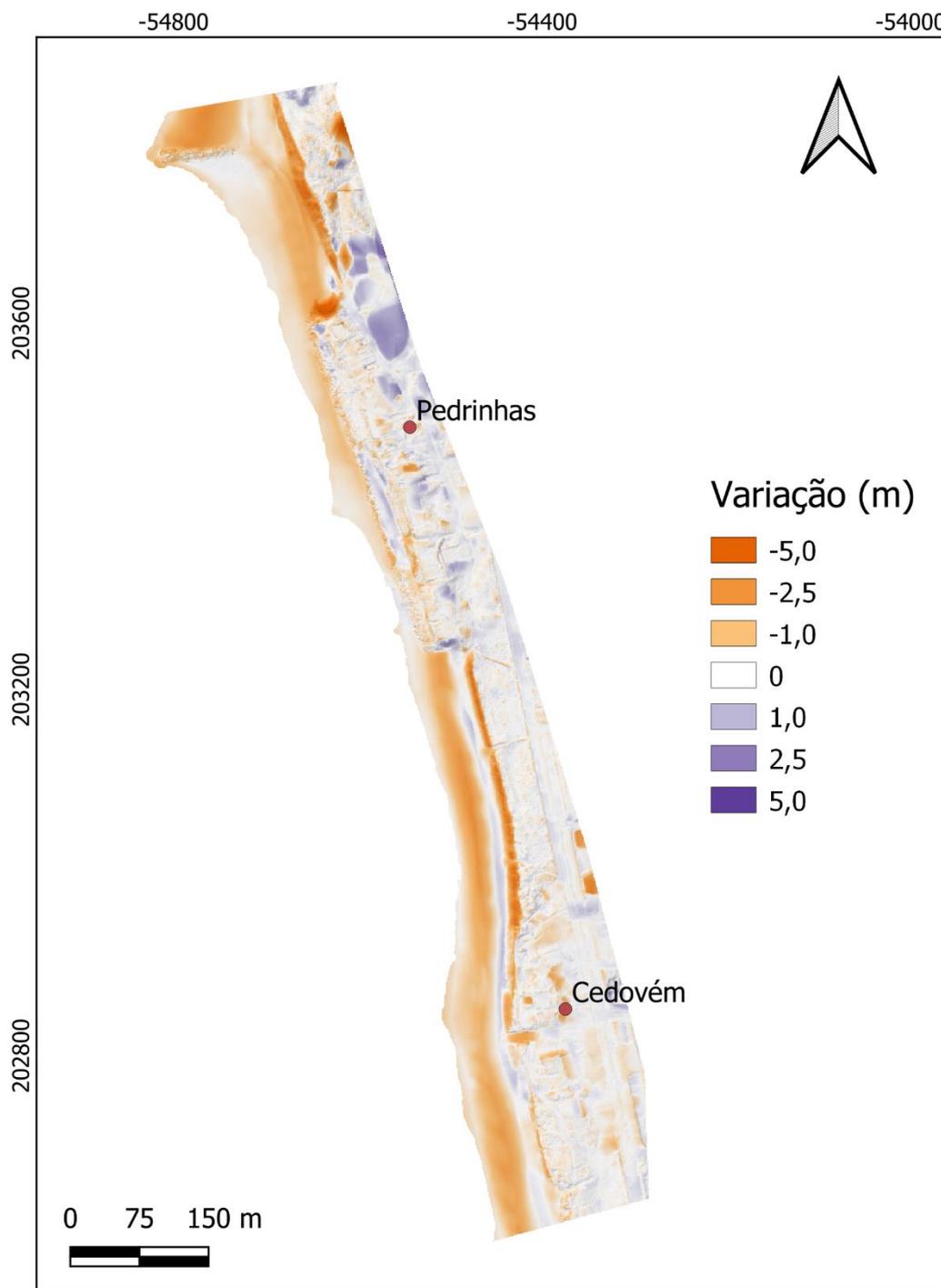


Figura 32 - Mapa de variação altimétrica entre o ano de 2018 e 2021.

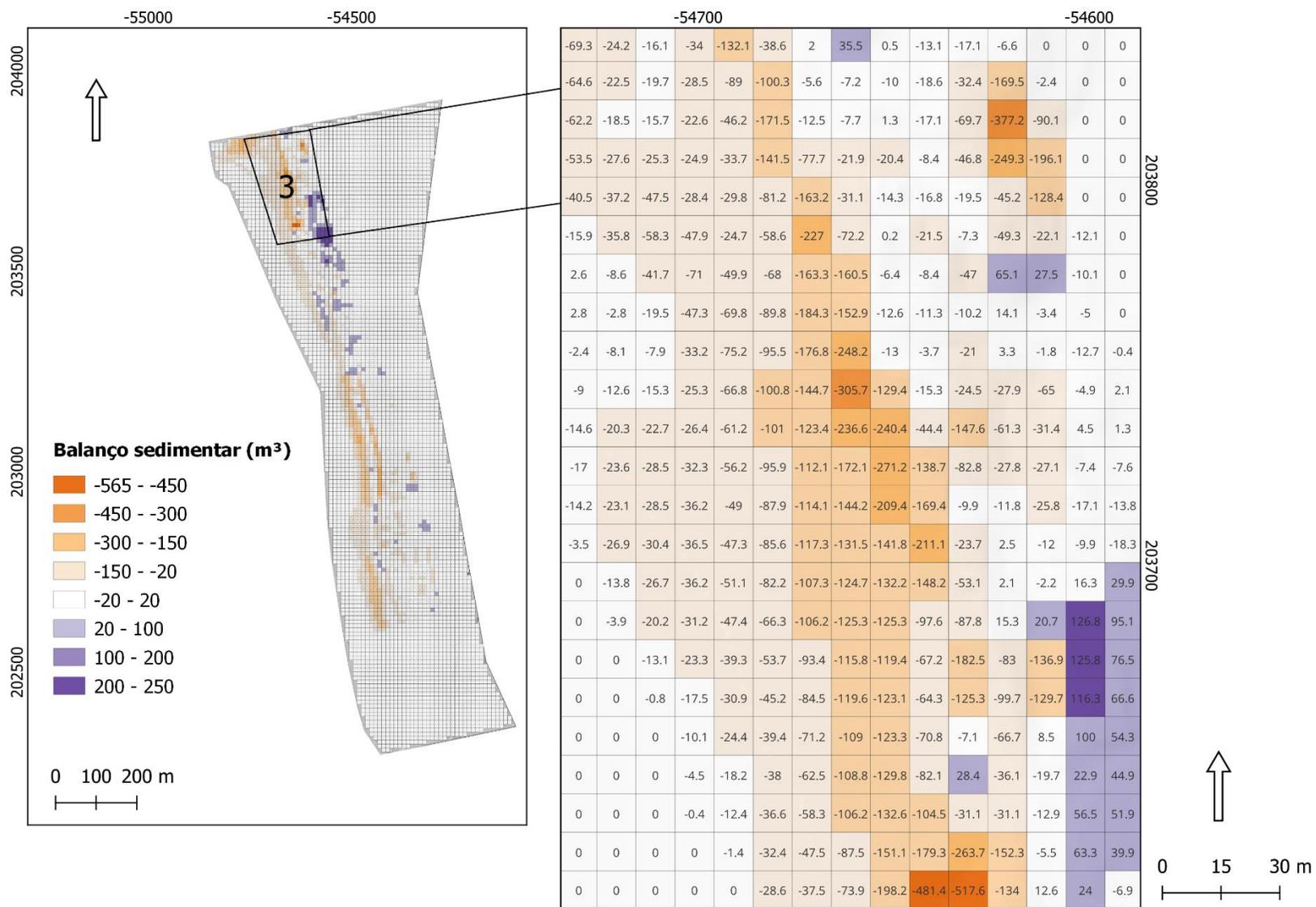


Figura 33 - Grelha de balanço sedimentar para o intervalo de tempo 2018-2021, com respectiva ampliação de uma área de interesse.

Para o intervalo de tempo entre **2011 e 2021**, os resultados do mapa mostram:

Perda clara de altimetria na quase totalidade da praia, sendo a única exceção a zona sul (variação altimétrica positiva). Ainda assim, os resultados mais negativos são a periferia do núcleo das Pedrinhas, tanto a norte, como a sul. Os valores negativos representam principalmente a zona da arriba de erosão. Ocorreram variações altimétricas positivas em locais perto, ou abrangidos pela linha de água e em zonas centrais da praia.

A grelha de balanço sedimentar demonstra em melhor perspetiva os resultados do mapa. O setor junto ao esporão (área 1), apresenta um balanço sedimentar significativamente negativo, registando valores mínimos entre os -555 e os -565 m³, nas quadriculas da ponte norte do núcleo das Pedrinhas. A zona da arriba de erosão entre os dois núcleos habitacionais (área 2) revela, também, um balanço sedimentar negativo, com várias quadriculas abaixo dos -300 m³.

No que respeita ao intervalo de tempo entre **2018 e 2021** os resultados demonstram:

Uma perda clara de altimetria em praticamente toda a extensão da praia, com valores significativamente negativos na arriba de erosão. A zona entre os dois núcleos habitacionais apresenta uma ligeira faixa com valores positivos. Contudo, esta faixa não é visualizada na grelha volumétrica, o que significa que são valores muito próximos do zero.

Os valores positivos nas extremidades do núcleo das Pedrinhas, também visíveis nas quadriculas da grelha de volumes, tanto na área 3 como na área 4, devem-se às obras efetuadas no local, como a colocação de sacos de areia.

A grelha volumétrica demonstra novamente os valores negativos da periferia do núcleo das Pedrinhas, particularmente na arriba de erosão. Especificamente na área 3, foram obtidas quadriculas com um balanço sedimentar bastante negativo (valor mínimo de -517.6 m³).

É importante referir que a ponta sul da área de estudo não é abrangida pelo LiDAR de 2018 utilizado, pelo que não é possível retirar conclusões sobre este local.

Efetuada uma comparação dos resultados dos diferentes intervalos de tempo, é possível perceber que a periferia do núcleo das Pedrinhas revela-se bastante problemática, sendo que a periferia norte apresenta resultados ainda assim piores. Os valores negativos representam principalmente a arriba de erosão. Neste local, não ocorre reposição de sedimento, ocorrendo apenas erosão, o que significa o avanço do mar e a rebentação das ondas perto ou sobre a arriba, provocando o seu desabamento.

4.3. Comparação do volume sedimentar

Foram criados quatro polígonos e produzidas as respectivas tabelas de resultados, referentes ao balanço sedimentar para dois intervalos de tempo diferentes, ou seja, 2011-2021 e 2018-2021. Este método foi utilizado para assim ser possível efetuar uma comparação para os mesmos locais entre anos mais antigos e mais recentes. O parâmetro focado foi, principalmente, o volume relativo. Foi utilizado o MDS de 2018 como base, e, como este modelo não abrange toda a praia, nomeadamente a extremidade sul, esta não pode ser discutida. Contudo, permite uma melhor compreensão e comparação do balanço sedimentar em relação a grande parte da área de estudo.

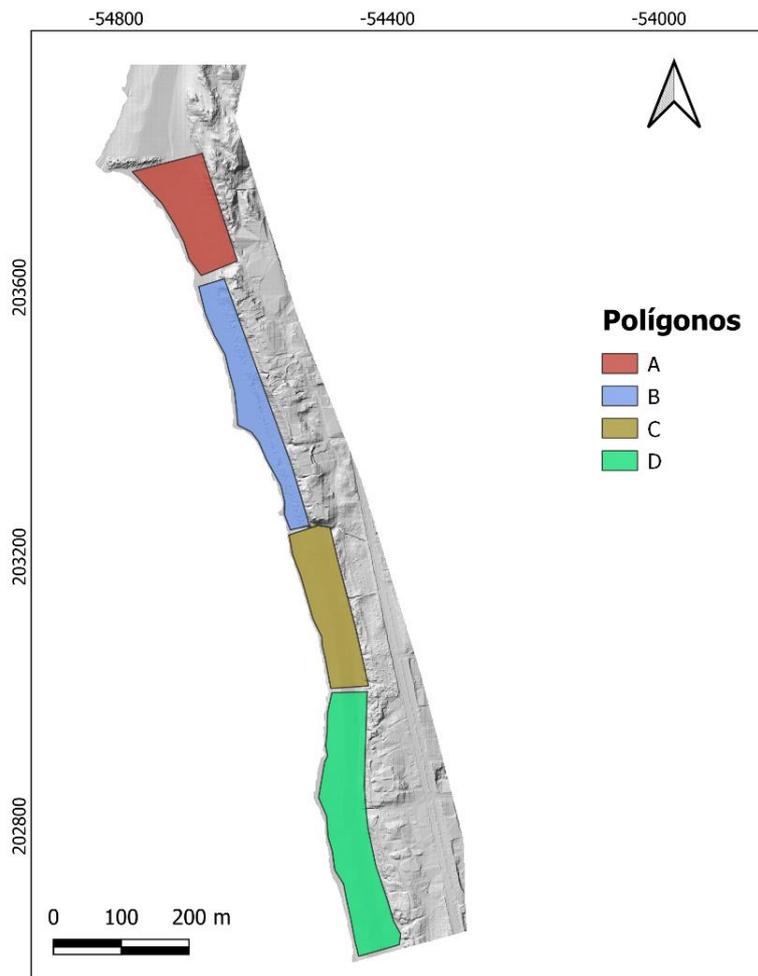


Figura 35 - Polígonos criados para o cálculo de volume entre 2011-2021 e 2018-2021.

Tabela 1 - Resultados do balanço sedimentar entre 2011 e 2021.

Polígono	Área (m ²)	Volume acima (m ³)	Volume abaixo (m ³)	Balanço (m ³)	Volume relativo (m ³ / m ²)	30 % do volume relativo
A	13167.66	503.8	17820.10	-17316.30	-1.31	-0.39
B	14482.51	488.50	11482.50	-10994.00	-0.76	-0.23
C	13864.70	100.60	15022.40	-14921.80	-1.08	-0.32
D	23260.27	6474.60	8617.80	-2143.20	-0.09	-0.03

Tabela 2 - Resultados do balanço sedimentar entre 2018 e 2021.

Polígono	Área (m ²)	Volume acima (m ³)	Volume abaixo (m ³)	Balanço (m ³)	Volume relativo (m ³ / m ²)
A	13167.66	88.00	10256.70	-10168.70	-0.77
B	14482.51	840.60	5370.80	-4530.20	-0.31
C	13864.70	392.30	12557.20	-12164.90	-0.88
D	23260.27	862.50	16541.20	-15678.70	-0.67

Para o período entre 2011 e 2021, os polígonos A e C apresentam os valores negativos mais significativos no que concerne ao volume relativo. Estes polígonos representam a periferia do núcleo das Pedrinhas. A presença da arriba de erosão, ao contrário dos polígonos B e D, pode explicar estes valores.

O polígono D apresenta um valor muito próximo do valor nulo, ou seja, este local poderá registrar uma aparente estabilidade.

No que respeita ao período entre 2018 e 2021, todos os polígonos apresentam valores negativos, havendo ainda assim diferenças relativamente ao período anterior. Atendendo a que este intervalo de tempo representa 3 anos, ou seja, 30 % do intervalo de tempo anterior (10 anos), os valores de balanço sedimentar deveriam representar aproximadamente também 30% dos valores de 2011 a 2021. Todavia, essa situação não se regista.

Assim, comparativamente ao intervalo de tempo 2011-2021, os polígonos A, B e C registam uma diminuição do volume relativo, mas, em termos proporcionais, aumentaram a taxa de perda sedimentar. Para A, a taxa duplicou e para C quase triplicou. No que respeita ao polígono D, este teve um aumento elevado do volume relativo e gigantesco da taxa de perda sedimentar (22 vezes). O polígono B é o que revela os resultados mais lisonjeiros, mas dever-se-á às construções e barreiras físicas do local e à menor quantidade de sedimento que esta zona já apresenta. Os polígonos A e C, ou seja, a periferia do núcleo das Pedrinhas, evidenciam os piores resultados, tal como no período 2011-2021. Ainda assim, o polígono D representa a área onde a situação mais se agravou.

4.4. Linha de vegetação e perfis de projeção

Serão apresentados e discutidos os resultados em relação à evolução da linha de vegetação de todo o local de estudo, desde o ano de 1958 até 2021 (figura 36). Para uma melhor visualização, o local foi dividido em quatro áreas diferentes (figuras 37a, 37b, 38a e 38b). Além disso, serão exibidos e analisados três perfis de projeção, entre os anos de 1958-2012, 1958-2021 e 2012-2021 (figuras 39a, 39b e 39c). Os perfis de projeção representam as variações da taxa de migração anual da linha de vegetação.



Figura 36 - Linhas de vegetação de diferentes anos para toda a área de estudo.

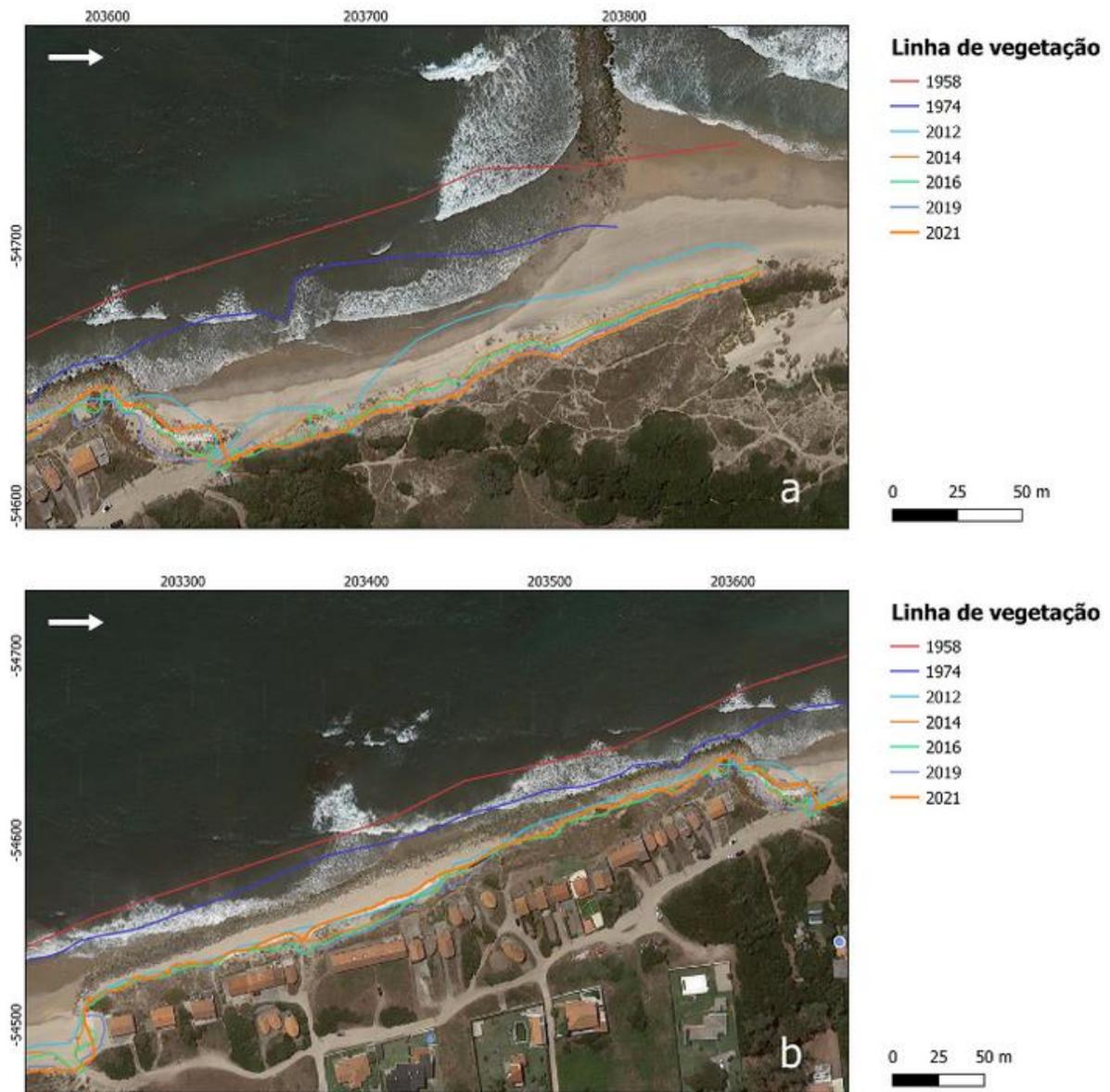


Figura 37 - Linhas de vegetação de diferentes anos: (a) para a extremidade norte, junto ao esporão; (b) para o núcleo das Pedrinhas.

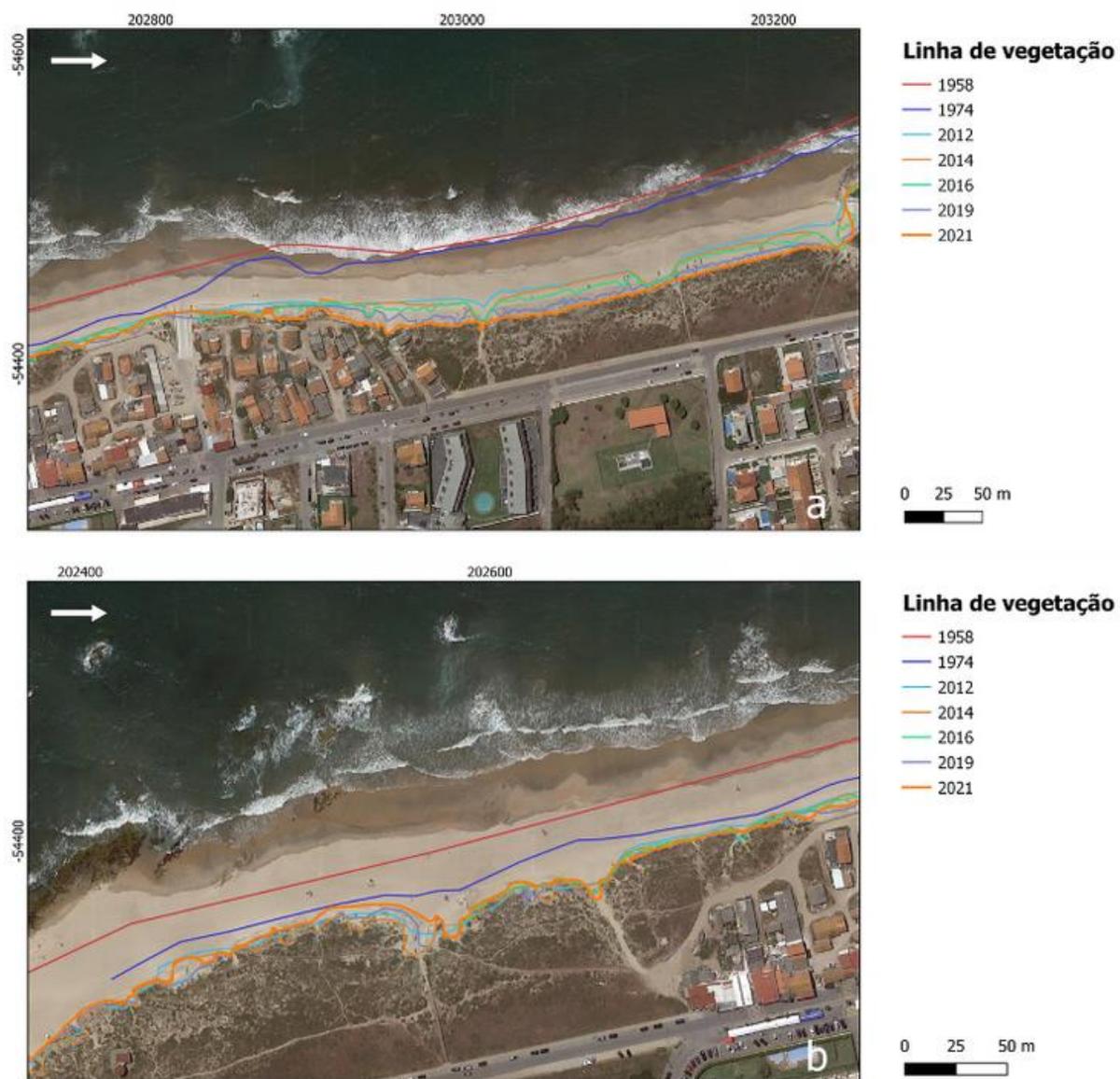


Figura 38 - Linhas de vegetação de diferentes anos: (a) para a zona a sul do núcleo das Pedrinhas, até grande parte do núcleo de Cedovém; (b) para a extremidade sul.

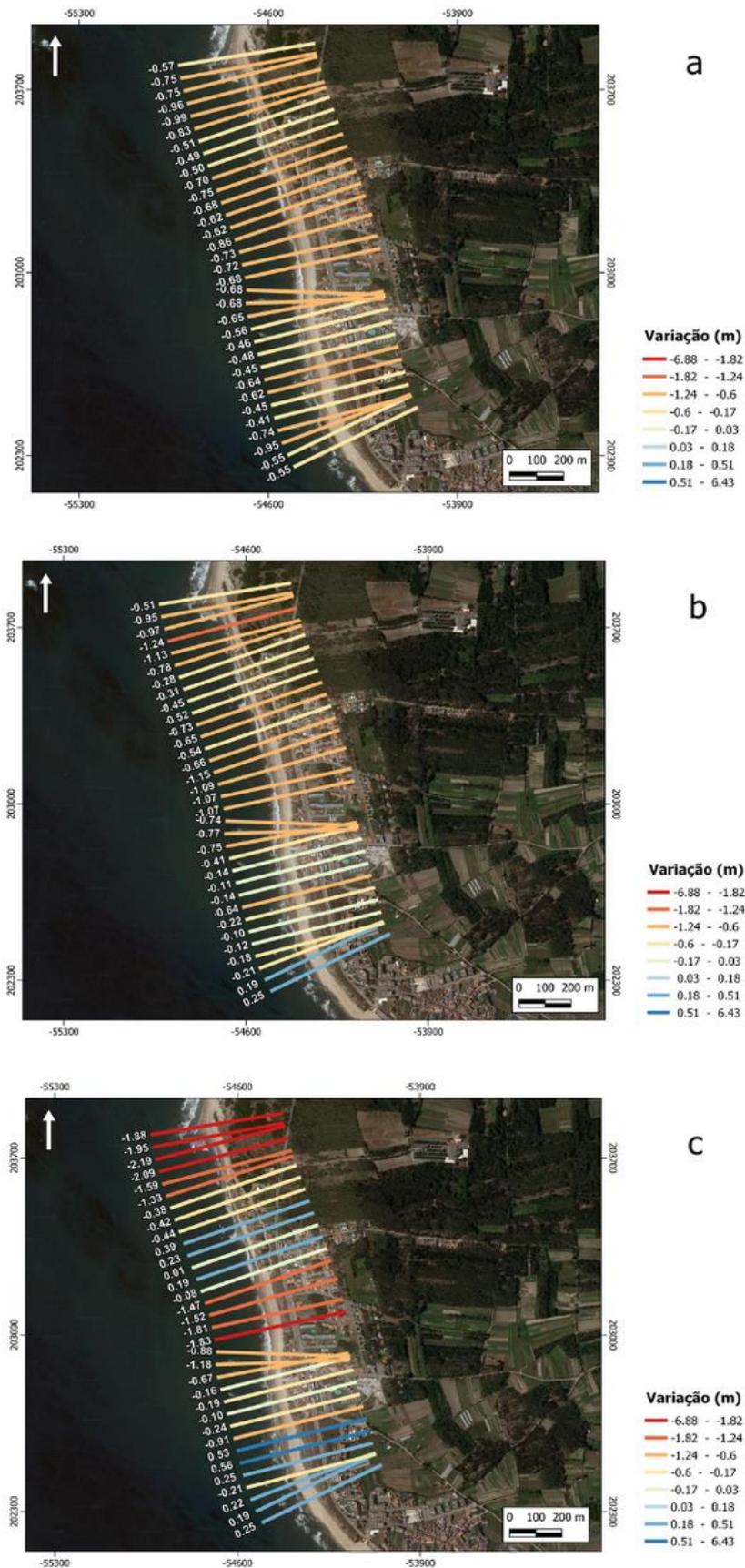


Figura 39 - Perfis de projeção referentes aos intervalos de tempo: (a) 1958-2012; (b) 1958-2021; (c) 2012-2021.

No que se refere aos resultados da linha de vegetação, é perceptível que houve um recuo da mesma em todo o local de estudo, se analisarmos a partir do ano de 1958 e até mesmo de 1974. Contudo, se observarmos a partir de 2012, existem pontos onde a linha de vegetação recuou, outros onde se manteve inalterada ou ainda outros onde avançou.

A **figura 37a**, representa a extremidade norte do local de estudo, junto ao esporão. Neste local, é identificável um recuo progressivo da linha de vegetação, desde o ano de 1958 até 2021. Foram identificados alguns pontos, onde, desde 1958 até 2021, a linha de vegetação migrou cerca de 77 metros para o interior. Analisando anos mais recentes, desde 2012 até 2021, foram obtidas diferenças na ordem dos 26 metros em certos pontos. Este recuo acentuado pode ser consequência da elevada perda de sedimentos deste local, estudada no capítulo anterior, o que permite ao mar ir avançar gradualmente para o interior, causando o recuo da vegetação existente.

A **figura 37b**, representa a área do núcleo das Pedrinhas. Aqui, se analisarmos a partir de 2012, a variação da linha de vegetação não apresenta resultados negativos, tendo variado positivamente, ainda que pouco, em certos pontos e mantendo-se estável noutros. Esta situação poderá ser explicada pela presença do enrocamento longilitoral, das próprias habitações e das barreiras físicas construídas no local, ou seja, a vegetação deixa de migrar por proteção da vegetação ou por perda deste indicador, substituído por estruturas rígidas.

A **figura 38a**, representa a área sem construções a sul da imagem anterior (37b) e também o núcleo de Cedovém. No primeiro local, observa-se uma variação regressiva da linha de vegetação, de 1958 até 2021. No extremo norte da imagem, registam-se valores de migração para o interior na ordem dos 72 metros desde 1958, e dos 14 a 15 metros desde 2012. Avançando para sul, os valores vão descendo se analisarmos desde 1958, mas mantêm-se constantes nos últimos nove anos do estudo (valores entre os 15 a 16 metros). A influência do esporão poderá ser aqui ainda significativa. Relativamente ao núcleo de Cedovém, desde 2012, ocorre uma variação negativa na zona norte do núcleo, com valores parecidos com a área anterior. No resto do núcleo, a situação é semelhante com o núcleo das Pedrinhas (figura 37b), ou seja, ocorre uma estabilização, e também um avanço nalguns pontos, da linha de vegetação.

A **figura 38b**, representa a extremidade sul da zona de estudo. Apesar de se observar um recuo da linha de vegetação desde 1958, a partir de 2012 os valores têm-se mantido estáveis. Ocorreram variações negativas nalguns pontos, mas predominam os pontos com variações positivas, provavelmente com o contributo de sedimento subtraído à praia e dunas situadas mais a norte. Como foi analisado no

capítulo anterior, esta zona tem ganho volume de areia, o que permite à linha de vegetação manter-se estável ou até avançar.

Relativamente aos perfis de projeção, estes foram analisados individualmente, tendo sido posteriormente efetuada uma comparação entre eles. Foi dada uma maior importância aos resultados mais recentes, pois permitem uma melhor percepção da dinâmica atual do local.

Perfil de projeção de **1958 a 2012** (figura 39a):

- Variação negativa em todo o local de estudo, situando-se o valor mínimo nos -0,41 metros e o valor máximo nos -0,99 metros;
- A extremidade norte (entre o esporão e o núcleo das Pedrinhas), apresenta, ainda assim, uma variação negativa mais acentuada, com valores negativos mínimos de -0,75 metros.

Perfil de projeção de **1958 a 2021** (figura 39b):

- Variação negativa em grande parte do local de estudo;
- A periferia do núcleo das Pedrinhas, tanto a norte como a sul, apresenta os piores resultados, registando a extremidade norte o valor negativo mínimo (-1,24 metros);
- Na metade sul do núcleo de Cedovém ocorre uma variação negativa ligeira;
- O único local com variação positiva é a extremidade sul, registando um valor de 0,25 metros.

Perfil de projeção de **2012 a 2021** (figura 39c):

- A extremidade norte regista as maiores variações negativas, registando um valor mínimo de -2,19 metros;
- O núcleo das Pedrinhas apresenta uma variação positiva na metade sul;
- Ocorre uma variação negativa a sul do núcleo das Pedrinhas e até ao final do núcleo de Cedovém, com menor intensidade neste último;
- A extremidade sul apresenta os melhores resultados, ocorrendo ganhos com um valor máximo de 0,56 metros.

Efetuada uma comparação entre os três perfis de projeção, é visível que os últimos nove anos do estudo, ou seja, entre 2012 e 2021, revelam claramente os resultados mais negativos em grande parte da área de estudo, especialmente na extremidade norte e na zona entre os dois núcleos, o que significa que, nestes locais, a situação agravou-se bastante nos últimos anos.

Por outro lado, é também nesse intervalo de tempo, de 2012 a 2021, que a área de estudo apresenta mais zonas com variações positivas, com especial incidência na parte sul.

4.5. Evolução futura

Os resultados que se seguem estão relacionados com a evolução da linha de vegetação, dentro de dez e vinte anos (figuras 40 e 41). A evolução da linha de vegetação permite perceber a evolução da linha de água, pois estes dois parâmetros estão relacionados, isto é, um recuo da linha de vegetação significa um avanço da linha que o mar atinge. Para uma melhor visualização, os resultados foram divididos em duas imagens.

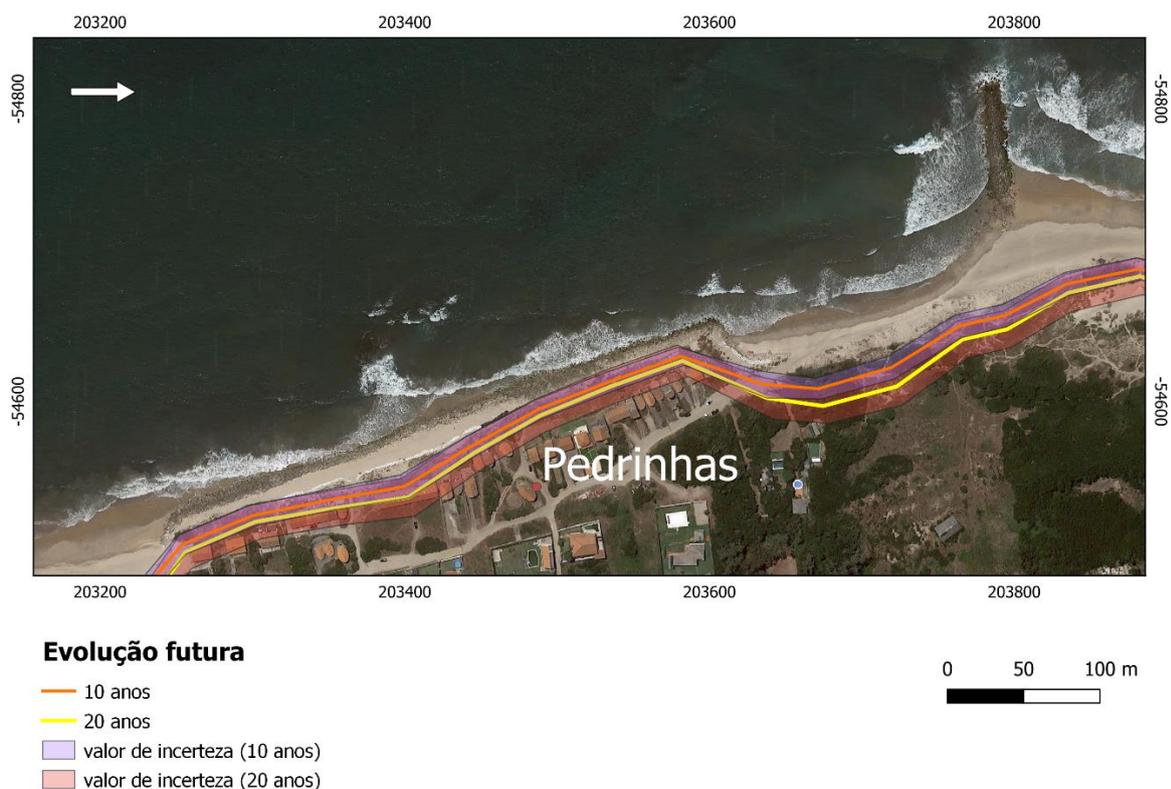


Figura 40 – Previsão da linha de vegetação dentro de 10 e 20 anos, relativa ao setor norte da área de estudo.

Em relação à **figura 40**, podemos concluir que:

- O local entre o esporão e o núcleo das Pedrinhas apresenta os piores resultados. A linha de vegetação terá migrado para o interior valores próximos dos 15 e 30 metros em 10 e 20 anos, respetivamente, em relação à posição atual;

- No núcleo das Pedrinhas será registado um recuo menor que a zona anterior, devido à presença das barreiras físicas existentes. Contudo, dentro de 10 anos, as primeiras casas poderão ser atingidas.



Figura 41 – Previsão da linha de vegetação dentro de 10 e 20 anos, para os setores central e sul da área de estudo.

Relativamente à **figura 41**, esta diz-nos, caso não ocorra qualquer intervenção, que:

- A linha de vegetação entre os dois núcleos de habitações continuará a migrar para o interior, com valores superiores a 10 e 20 metros, em 10 e 20 anos respetivamente. Isto significa um recuo de, pelo menos, 1 metro por ano. O mar ficará muito próximo da Avenida Marginal de Cedovém, visível na imagem, pois a linha de vegetação, daqui a apenas 10 anos estará a menos de 30 metros;
- No núcleo de Cedovém ocorrerá recuo, sensivelmente até meio (até à rampa de acesso dos barcos de pesca), mantendo-se estável nos restantes metros;
- A zona a sul manter-se-á estável, pelo menos nos próximos 20 anos.

4.6. Síntese de resultados

Os resultados dos mapas de variação altimétrica e das grelhas de volume revelam que a periferia do núcleo das Pedrinhas apresenta a situação mais preocupante. Ainda assim, na periferia norte são observados valores ligeiramente piores. Estes resultados negativos incidem principalmente sobre a arriba de erosão. As zonas onde se situam as habitações (núcleos das Pedrinhas e Cedovém), como previsto, registam perdas mais ligeiras de volume e altimetria, pois aqui, a arriba já não existe, consistindo apenas em rocha e construções, desaparecendo apenas sedimento da praia e não da arriba.

A zona sul da área de estudo, que engloba o núcleo de Cedovém, quando analisamos desde 2011 a 2021 apresenta resultados menos negativos no que respeita à perda altimétrica e de volume, mas ainda assim, continua a haver erosão (ainda que menor), sendo a zona mais estável a extremidade sul. Quando observamos apenas a partir de 2018, os resultados continuam a ser negativos, piorando mesmo na zona sul.

Relativamente à comparação da variação da taxa sedimentar para quatro áreas diferentes da área de estudo, os resultados são negativos. Por um lado, para o intervalo de tempo de 10 anos entre 2011 e 2021, principalmente os polígonos A e C, revelaram os valores negativos mais elevados de volume relativo (zona da arriba de erosão). Já o polígono D apresentou um valor próximo do nulo, o que aparenta uma relativa estabilidade. Por outro lado, para o intervalo de tempo de 3 anos entre 2018 e 2021, todos os polígonos, proporcionalmente comparando com o intervalo de tempo anterior, aumentaram a sua taxa de perda sedimentar. O polígono A, duplicou e o C quase triplicou. Contudo, o resultado mais excessivo foi do polígono D que registou um aumento de 22 vezes da sua taxa de perda sedimentar. Os polígonos A e C continuam a ser os locais com volume relativo mais negativo, mas a área correspondente ao polígono D foi a que registou um maior agravamento da situação.

A linha de vegetação recuou em toda a área de estudo, se atentarmos a partir de 1958. Contudo, se analisarmos anos mais recentes, nomeadamente a partir de 2012, a situação é diferente. Assim sendo, a vegetação recuou principalmente entre o esporão e o núcleo das Pedrinhas e entre os dois núcleos. Como visto anteriormente, estas zonas perderam bastante cota de praia e volume de sedimentos, permitindo ao mar atingir zonas mais interiores, resultando num recuo da vegetação. Os dois núcleos, Pedrinhas e Cedovém, apresentam a sua linha de vegetação estabilizada, ainda que regredindo e avançando muito ligeiramente em certos pontos. Esta estabilidade está relacionada com a presença das próprias habitações e barreiras de defesa do local, aliadas à sua altimetria (acima do nível do mar), protegendo a vegetação que aí possa existir, ou seja, são valores sem grande significado. Por último, a

extremidade sul regista maioritariamente pontos onde a vegetação avançou ou manteve-se inalterada. Como estudado anteriormente, este local regista uma situação mais estabilizada ao nível de perda sedimentar e altimetria, permitindo à vegetação manter-se ou avançar.

Os perfis de projeção mostram a tendência erosiva de grande parte da praia nos últimos 63 anos. Ainda assim, é desde 2012 que ocorreu um agravamento da situação, com especial incidência junto ao esporão (extremidade norte) e entre os dois núcleos habitacionais. Por outro lado, a metade sul do núcleo das Pedrinhas apresenta uma variação positiva na última década, consequência das barreiras físicas aí existentes, já que a tendência lógica do local seria negativa, como são as das zonas a norte e a sul do núcleo. A zona sul da área de estudo apresenta uma variação positiva significativa, um resultado esperado, devido à estabilização que a vegetação aí tem registado.

As previsões futuras apontam para cenários negativos em grande parte da área de estudo, tendo destaque a extremidade norte, onde a linha de vegetação poderá recuar quase 30 metros nos próximos 20 anos. A zona central, entre os dois núcleos, também apresenta valores preocupantes, pois a vegetação recuará aproximadamente 10 metros nos próximos 10 anos, ou seja, uma velocidade de 1 metro por ano. Esta situação projeta o mar muito próximo da Avenida Marginal de Cedovém, pondo-a em risco. A plataforma que se prolonga para o interior da freguesia, a partir do traçado da avenida, fica também seriamente exposta, dado que se encontra a uma cota inferior em relação ao cordão dunar, com diferenças na ordem dos 10 metros, colocando assim em risco todos os bens e pessoas existentes. Relativamente às habitações dos dois núcleos, as casas estarão ainda mais em risco, podendo vir a ser atingidas pelo mar na próxima década. No que respeita à extremidade sul, os valores indicam que manter-se-á estável, pelo menos durante os próximos 20 anos.

Capítulo 5 - Conclusões

A conjugação de material e dados provenientes de técnicas de monitorização diferentes, como o LiDAR, fotografia aérea, fotogrametria, VANTs e SIG mostrou ser vital para a análise e avaliação de diferentes parâmetros de uma determinada área de estudo. No caso deste trabalho, permitiu avaliar fatores, como a altimetria, o volume sedimentar, a linha de vegetação e a sua taxa de migração ao longo dos últimos anos, na praia de Pedrinhas e Cedovém, demonstrando simultaneamente a importância das técnicas de monitorização anteriormente referidas.

Relativamente ao processamento dos dados, os SIG, nomeadamente o software QGIS, mostrou-se uma ferramenta fácil de utilizar e bastante útil, para a edição, manipulação e análise dos MDS, permitindo obter resultados relativos à variação do volume sedimentar, da altimetria e ainda para a análise da migração passada da linha de vegetação, bem como a sua evolução futura.

No que respeita ao trabalho de campo, este não correu como inicialmente previsto. Este trabalho tinha como objetivo o mapeamento recente, ou seja, em 2022, da área de estudo, com recurso a um VANT. Contudo, as sucessivas condições meteorológicas desfavoráveis, não permitiram o levantamento do VANT e foi decidido utilizar um mapeamento ligeiramente mais antigo, do ano de 2021, processado pelo Professor Doutor Renato Henriques.

Quanto à discussão e interpretação dos resultados, focados principalmente na última década, a praia das Pedrinhas e Cedovém apresenta duas zonas bem distintas, no que respeita à variação de volume de sedimentos, variação altimétrica e evolução da linha de vegetação. Os setores norte e central, que englobam o núcleo das Pedrinhas e a sua periferia, tanto a norte, como a sul, registaram os valores mais negativos, tendo ocorrido perda acentuada de volume sedimentar, de cota da praia (principalmente na zona da arriba de erosão) e ainda recuo acentuado da linha de vegetação. Por outro lado, o setor sul, que engloba o núcleo de Cedovém e restante área a sul apresenta variações negativas mais ligeiras ou nulas, e mesmo positivas, principalmente na extremidade sul, local que apresenta uma situação mais estável ao nível da perda altimétrica e sedimentar e ainda da evolução da linha de vegetação.

A situação negativa dos setores norte e central, poderá dever-se ao esporão situado a barlar e ao próprio enrocamento longilitoral das Pedrinhas. Na extremidade norte, a presença do esporão provoca uma reflexão de energia por parte das ondas, originando uma espécie de remoinho que retira grande quantidade de sedimento. Além disso, o enrocamento longilitoral funciona também como uma barreira refletiva, levando a uma diminuição da cota da praia na sua periferia e ao desenvolvimento de uma

proeminência. Esta, atua como mais um esporão, aumentando a difração das ondas e a vorticidade do espalho, tanto a norte como a sul, exercendo assim erosão sobre a arriba de forma constante, o que provoca o desabamento da duna frontal e a retirada de sedimento.

No setor sul, os resultados mais satisfatórios poderão ser explicados com o facto de os sedimentos erodidos mais a norte, apresentarem tendência a deslocarem-se para esta zona, devido à deriva litoral. Outra razão prende-se com o menor rebaixamento de cota da praia ocorrido neste local, uma consequência, da menor influência, tanto do esporão como do enrocamento longilitoral.

No que concerne à flora da área de estudo, estão presentes espécies autóctones e típicas dos ambientes costeiros portugueses. Contudo, foram também registados números elevados de indivíduos de espécies invasoras, como o chorão-das-praias (*Carpobrotus edulis*), presente em praticamente toda a extensão do território e acácia-de-espigas (*Acacia longifolia*), registada principalmente na parte norte, junto ao núcleo das Pedrinhas. Esta situação é negativa, pois estas plantas formam povoamentos bastantes densos, impedindo o desenvolvimento da vegetação nativa, resultando em perda de diversidade biológica e ainda, no caso das acácias (plantas lenhosas), aumentando o risco de incêndio no local.

As previsões futuras apontam cenários preocupantes para os setores norte e central, onde a linha de vegetação continuará a recuar acentuadamente, colocando em risco o núcleo das Pedrinhas e toda a sua periferia. O local entre os dois núcleos habitacionais apresenta um cenário especialmente problemático, pois ocorrerá um recuo de cerca de 1 metro por ano, o que daqui a 10 anos colocará o mar muito próximo da Avenida Marginal de Cedovém, pondo a própria avenida em risco. Além disso, a plataforma que se prolonga para o interior da freguesia, a partir do traçado da avenida, ficará exposta, já que se encontra abaixo da cota do cordão dunar, colocando assim em risco pessoas, bens e habitações aí existentes. O núcleo de Cedovém também apresentará um recuo da linha de vegetação, especialmente na parte norte, mas mais ligeiro. A restante área a sul manter-se-á estável, pelo menos nos próximos 20 anos.

Referências

- Aber, J. S., Ries, J. B., & Marzoff, I. (2010). *Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications*, 1–266.
- Andrade, C., Freitas, C., Cachado, C., Cardoso, A. C., Monteiro, J. H., Brito, P., & Rebelo, L. (2002). *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures (SIAM Project)*. In *Coastal Zones*.
- APA. (2022). *Planos de Ordenamento da Orla Costeira* | Agência Portuguesa do Ambiente. Obtido de: <https://apambiente.pt/agua/planos-de-ordenamento-da-orka-costeira-0>
- Boak, E. (2005). *Shoreline definition and detection: a review*. *Meridian.Allenpress.Com*, 214, 688–703.
- Cabral J. (1986). *A neotectónica de Portugal continental. Estado actual dos conhecimentos*.
- Chang, K.-T. (2017). *Geographic Information System*. *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*, 1–9.
- Davis, C., & Câmara, G. (2001). *Arquitetura de sistemas de informação geográfica. Introdução à Ciência Da Geoinformação*. São José Dos Campos: INPE, 35.
- Decreto-Lei n.º 159/2012, de 24 de julho de 2012, *Diário da República*, 142/2012, Série I de 2012-07-24. (2022). Obtido de: <https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/159-2012-179368>.
- Eisenbeiss, H. (2009). *UAV photogrammetry*.
- El-Rabbany, A. (2002). *Introduction to GPS: the global positioning system*.
- Erlandson, J. M. V. (2012). *As the world warms: Rising seas, coastal archaeology, and the erosion of maritime history*. *Journal of Coastal Conservation*, 16(2), 137–142.
- Ferreira, I. G. (2014). *A Problemática da Erosão Costeira: O Caso Específico da Praia do Pedrógão*.
- Foote, E. K., & Lynch, M. (1996). *Geographic Information Systems as an Integrating Technology: Context. Concepts and Definations, The Geographer's Craft Project, Department of Geograpy, University of Texas at Austin*.
- Gault, J., Mulder, J., van Rijn, L., Sano, M., & Sutherland, J. (2010). *Concepts and science for coastal erosion management*.
- Gomes, A. M. de F. (2018). *Monitorização e modelação da morfodinâmica costeira através de veículos aéreos não tripulados (VANT): Casos de estudo nas praias de Belinho, Fieiro Alto e Cepães*.
- 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)*.
- Gomes, P., Botelho, A., & Carvalho, G. (2002). *Sistemas dunares do litoral de Esposende*.
- Gomes, Pinto, F., Neves, L., & Pais, J. (2006). *EuroSION-a european initiative for sustainable coastal erosion. Pilot Site of River Douro–Cape Mondego and Case Studies of Estela, Aveiro, Caparica, Vale Do Lobo and Azores*. IHRH, Porto, Portugal.

- Gonçalves, J. A., & Henriques, R. (2015). UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 101–111.
- Hanson, H., & Lindh, G. (1993). Coastal erosion - an escalating environmental threat. *Ambio*, 22(4), 188–195.
- Henriques, R. F. (2006). Monitorização da zona costeira tendo em vista a sua vulnerabilidade – aplicação à zona costeira noroeste de Portugal.
- Henriques, R., Marcolin, P., Gomes, M., Costa, T., Silva, V., & Dias, R. (2020). Projeto de Requalificação Ambiental e Valorização das Atividades Tradicionais em Pedrinhas e Cedovém.
- Hirt, C. (2015). Digital Terrain Models.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Loureiro, E. (2006). Indicadores geomorfológicos e sedimentológicos na avaliação da tendência evolutiva da zona costeira, Tese de Doutoramento, 352 p.
- Loutre, M. F. (2003). Ice ages (Milankovitch theory). *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, 995–1003.
- Maia, J. P. (2021). Evolução recente da dinâmica costeira no setor Afife-Arda (Viana do Castelo).
- Marinho, B., Coelho, C., Hanson, H., & Tussupova, K. (2019). Coastal management in Portugal: Practices for reflection and learning. *Ocean & Coastal Management*, 181, 104874.
- Moore, L. J. (2000). Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, 16(1), 111–124.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023). What is LIDAR. Obtido de: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>.
- Nemmaoui, A., Aguilar, F., Aguilar, M. (2019). DSM and DTM generation from VHR satellite stereo imagery over plastic covered greenhouse areas. Elsevier.
- Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2015). Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment.
- QGIS. (2022). Obtido de: <https://www.qgis.org/en/site/index.html>.
- Paskoff, R. (1998). Conséquences possibles sur les milieux littoraux de l'élévation du niveau de la mer prévue pour les prochaines décennies. *Annales de Géographie*, 233–248.
- Pedrosa, A. de S. (2013). Risco de erosão no litoral norte de Portugal: uma questão de ordenamento de território. 25(1), 133–145.
- Perez, B., Magalhaes, A., Goncalves, J., & Bastos, L. (2010). Monitoring of beaches and sand dunes using digital aerial photography with direct georeferencing.
- Ponte Lira, C., Silva, A. N., Taborda, R., & De Andrade, C. F. (2016). Coastline evolution of Portuguese low-lying sandy coast in the last 50 years: An integrated approach. *Earth System Science Data*, 8(1), 265–278.

- Ramos, T. F. F. (2011). Estudo da Reabilitação de Estruturas de Defesa Costeira: Casos de estudo do Mindelo, Norte do Furadouro e Torreira. 323.
- Santos, F. D., Lopes, A. M., Moniz, G., Ramos, L., & Taborda, R. (2014). Gestão da Zona Costeira o Desafio da Mudança. Relatório Do Grupo de Trabalho Do Litoral, 260.
- Tavares, A. O., Barros, J. L., Freire, P., Santos, P. P., Perdiz, L., & Fortunato, A. B. (2021). A coastal flooding database from 1980 to 2018 for the continental Portuguese coastal zone. *Applied Geography*, 135, 102534.
- Vine, M. F., Degnan, D., & Hanchette, C. (1997). Geographic information systems: Their use in environmental epidemiologic research. *Environmental Health Perspectives*, 105(6), 598–605.
- Williams, A. T., Rangel-Buitrago, N., Pranzini, E., & Anfuso, G. (2018). The management of coastal erosion. *Ocean & Coastal Management*, 156, 4–20.