

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



**Desenvolvimento de um Método Paramétrico Semiautomático
de Recuo do Perfil Topográfico da Costa devido aos Efeitos
Cumulativos de Erosão e Subida do Nível Médio do Mar**

Miguel Mata do Espírito Santo

Mestrado em Engenharia Geoespacial

Dissertação orientada por:

Professor Doutor Carlos Manuel Correia Antunes e
Professora Doutora Cristina Maria Sousa Catita

“Tudo o que o mar perde, o mar recupera”

Autor desconhecido

Agradecimentos

Serve o presente texto como nota de agradecimento a todas as pessoas que me apoiaram durante este trabalho de dissertação.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer todo o apoio e incentivo dos meus orientadores. Ao Professor Carlos Antunes agradeço pela sugestão deste tema de dissertação, pela idealização do algoritmo em que se centra esta dissertação e pela confiança depositada em mim. À Professora Cristina Catita agradeço por todo o seu incentivo, boa disposição, e atenção ao detalhe nas suas correções. Muito obrigada, pela vossa constante disponibilidade e amizade, não só durante estes últimos meses, mas durante todo o meu percurso académico. Um agradecimento especial também a todos os professores de Engenharia Geoespacial por todo o conhecimento partilhado ao longo destes anos e à Carolina pela orientação e amizade nesta jornada da minha vida. Agradeço particularmente à professora Paula Redweik pela ajuda numa parte essencial desta dissertação.

Agradeço muito aos meus colegas de curso de Engenharia Geoespacial, quer na licenciatura, quer no mestrado. Ao Vinicius por ser meu amigo desde o primeiro dia e por ter feito o meu percurso académico mais divertido e inesquecível. Ao Chico pelo companheirismo e paciência, especialmente quando não me calo com beisebol. À Vanessa por ser a minha companhia diária ao longo dos últimos meses, não podia ter pedido melhor companhia no final do meu percurso académico. Sem vocês os três, certamente não teria tido o sucesso que tive até agora. Agradecimento especial e caloroso ao Rafael por toda a companhia nos almoços, nos trabalhos e na vida. À Laura pela ajuda no Photomod e ao Tomás, João, Martinez, Renda e Elias por todas as risadas e por me terem acolhido como colegas mais velhos de curso. Um agradecimento especial também ao Pietro pela amizade nos meses que estive cá e pelo futuro acolhimento caso eu vá de férias ao Sul de Itália. Por fim, agradeço a todos os meus amigos de Sesimbra que me ajudaram a tornar na pessoa que sou e que tudo farei para nunca perder a sua amizade.

Quero agradecer do fundo do coração às pessoas que mais me apoiaram ao longo dos últimos anos e ao longo da minha vida inteira. À minha mãe, por ser uma das pessoas que mais admiro, por teres sido tão amiga, por todo o apoio e palavras certas no momento certo. Ao meu pai, que também é uma das pessoas que mais admiro neste mundo, por toda sabedoria, conselhos prestados e pela revisão do português deste documento. Obrigada por acreditarem em mim e estarem sempre do meu lado, sem vocês nada disto seria possível.

Finalmente, o obrigado mais especial à Rebeca, por me acompanhar há quase seis anos, por ser a minha melhor amiga e namorada e por me ajudar em tudo o que eu preciso e não preciso. Sem ti a vida não faria sentido. Um obrigado muito especial ao Tico pelas suas trapalhices e por fazer dos meus fins de semana a melhor parte da semana.

Resumo

Uma das consequências da subida do NMM é o aumento da erosão costeira e o recuo da linha de costa. A modelação e o acompanhamento das alterações costeiras revelam-se de extrema importância para uma melhoria da adaptação do território a estas alterações. Grande parte dos estudos que projetam cenários futuros da subida do NMM, têm em conta os perfis de costa e os respetivos modelos altimétricos atuais. Este estudo procura colmatar esta limitação, explorando uma nova metodologia de determinação do recuo da LC, recorrendo a princípios básicos da formulação modificada de *Bruun*, estimando a topografia modificada. Sobre esta topografia são criados cenários de inundação futura colmatando as incertezas dos cenários de inundação habituais.

Para validar a aplicabilidade desta metodologia, selecionou-se uma área de estudo na região da Costa Nova. A precisão dos resultados foi avaliada usando dados históricos de fotografia aérea, datados de 1958. Efetuou-se uma aerotriangulação dum bloco de fotografias aéreas, coordenando PF's no terreno, derivando-se o recuo da LC até à data atual. A comparação entre esta LC e a obtida pelo algoritmo evidenciou a existência de alterações antropogénicas à duna, conduzindo à necessidade de retificação dos parâmetros do algoritmo para validá-lo. Contudo, esta retificação impõe demasiada influência da subida do NMM no recuo de costa obtido, desconsiderando os efeitos do défice sedimentar e impossibilitando a realização da validação desta metodologia. Porém, foi possível estimar o volume de sedimentos perdidos e ganhos, devido ao recuo da costa, produzir cenários futuros de inundação extrema e quantificar o recuo da linha de costa. O volume de sedimentos que potencialmente serão perdidos é estimado em aproximadamente 629 mil m³ e o recuo médio obtido rondou os 1.4 m/ano. Os cenários de inundação com a topografia ajustada à época do cenário revelaram resultados consideravelmente diferentes dos produzidos anteriormente, evidenciando o recuo obtido.

PALAVRAS-CHAVE: Recuo da costa; Erosão Costeira, Alterações Climáticas; Regra de Bruun Modificada; Subida do Nível Médio do Mar

Abstract

One of the consequences of rising MSL is increased coastal erosion and shoreline retreat. Modeling and monitoring coastal changes is extremely important for improving the territory's adaptation to these changes. Most of the studies that project future scenarios for the rise of the MSL consider the coast profiles and the respective current altimetric models. This study seeks to overcome this limitation, exploring a new methodology for to determine the shoreline setback, resorting to the basic principles of Bruun's modified formulation, estimating the modified topography. Future flood scenarios are created over this topography, bridging the uncertainties of usual flood scenarios.

To validate the applicability of this methodology, a study area in the Costa Nova region was selected. The accuracy of the results was evaluated using historical aerial photography data, dated 1958. An aerial-triangulation of a block of aerial photographs was carried out, coordinating FP's on the ground, deriving the shoreline retreat to the present date. The comparison between this shoreline and the one obtained by the algorithm showed the existence of anthropogenic alterations to the dune, leading to the need to rectify the parameters of the algorithm to validate it. However, this rectification measures too much influence of the MSL rise on the coast retreat obtained, disregarding the effects of the sedimentary deficit, and making it impossible to carry out the validation of this methodology. However, it was possible to estimate the volume of sediments lost and gained due to shoreline retreat, produce future scenarios of extreme flooding, and quantify shoreline retreat. The volume of sediments that will potentially be lost is estimated at approximately 629 thousand m³ and the average retreat obtained was around 1.4 m/year. The flood scenarios with the topography adjusted to the time of the scenario revealed results considerably different from those previously produced, evidencing the retreat obtained.

KEYWORDS: Coast retreat; Coastal Erosion, Climate Change; Modified Bruun Rule; Rise of the Mean Sea Level

Índice

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Motivação	3
1.3	Contribuição científica.....	3
1.4	Estrutura da Tese	4
2	Estado do conhecimento atual.....	5
2.1	Conceitos	5
2.1.1	Referenciais Altimétricos	5
2.1.2	Modelo Digital de Terreno	5
2.1.3	Conceitos relacionados com a variação do Nível Médio do Mar	9
2.1.4	Erosão Costeira e Recuo da Linha de Costa.....	12
2.2	Revisão e análise da bibliografia	21
2.2.1	Métodos baseados em processos.....	22
2.2.2	Métodos semi-empíricos	28
3	Metodologia/Processamento	31
3.1	Área de estudo.....	33
3.1.1	Enquadramento Geográfico.....	33
3.1.2	Clima.....	33
3.1.3	Ocupação do solo.....	34
3.1.4	Relevo	36
3.2	Dados	39
3.3	Modelo Digital de Terreno.....	40
3.4	Cenário de subida do Nível Médio do Mar e cálculo do Máximo Espraio	42
3.4.1	Cenário de Subida do NMM.....	42
3.4.2	Máximo Espraio	43
3.5	Criação de perfis transversais.....	44
3.6	Adaptação da Regra de Bruun modificada (método semi-empírico do recuo da costa)	46
3.7	Determinação das linhas de costa simuladas.....	48
3.8	Sensibilidade dos Parâmetros.....	49
3.9	Validação dos resultados.....	51
3.10	Modelo Digital de Terreno simulado para 2100.....	58
3.11	Cenário de Inundação Costeira Extrema.....	59

4	Discussão e Análise de Resultados.....	62
4.1	Avaliação do recuo da linha de costa entre épocas (atual e futura).....	62
4.2	Avaliação da perda de sedimentos entre a época inicial e final	63
4.3	Avaliação do Cenário de Inundação Extrema	65
5	Conclusões	67
5.1	Conclusões sobre os objetivos propostos.....	67
5.2	Recomendações futuras	68
6	Referências Bibliográficas	69

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Classificação de ciclones e tempestades tropicais segundo a Saffir-Simpson hurricane wind scale [Fonte: National Hurricane Center (2022)]	18
Tabela 3.1 - Percentagem de ocupação de cada classe no solo da Costa Nova	36
Tabela 3.2 - Dados utilizados com a respetiva fonte, data de aquisição e observações	40
Tabela 3.3 - Valores de Preia-mar máxima, sobrelevação meteorológica, subida do NMM, <i>run-up</i> total e máximo espraio	44
Tabela 3.4 - Análise da Sensibilidade do parâmetro D	50
Tabela 3.5 - Análise da Sensibilidade do parâmetro k	50
Tabela 3.6 - Análise da Sensibilidade do parâmetro Fe	50
Tabela 3.7 - Coordenadas em ETRS89/PT-TM06 dos pontos fotogramétricos	53
Tabela 3.8 - Distância focal e distorções radiais da câmara que captou as fotografias aéreas	53
Tabela 3.9 - Classificação do parâmetro "Forçamento Costeiro" no Índice de Perigosidade de Inundação, com base na probabilidade de cada cenário de inundação. [Fonte: Antunes et al. (2019)].	60

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Diferença entre MDT e MDS [Fonte: Redweik, (2021)]	6
Figura 2.2 - Esquema explicativo do funcionamento do LiDAR [Fonte: https://flyguys.com/5-industry-use-cases-for-lidar/]	7
Figura 2.3 - Passos na geração de um modelo TIN [Fonte: Redweik, (2021)]	8
Figura 2.4 - Obtenção de um modelo GRID [Fonte: Redweik, (2021)].....	8
Figura 2.5 - Sistema Sol, Lua e Terra	9
Figura 2.6 - Diagrama explicativo de funcionamento das marés [Fonte: https://oceanhub.com.br/2020/04/11/o-que-sao-as-mares/]	10
Figura 2.7 - Maré em Cascais em 2022 [Fonte: https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html]	11
Figura 2.8 - Representação do Geóide [Fonte: https://www.wikiwand.com/pt/Geoide]	12
Figura 2.9 - Comparação entre taxas de subida do Nível Médio Mar em relação ao ano 2000 provenientes de diversas fontes [Fonte: https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html]	12
Figura 2.10 - Diferentes fontes e sumidouros responsáveis pelo balanço sedimentar [Fonte: Davidson-Arnott et al. (2019)]	13
Figura 2.11 - Esquematização da formação de déficit sedimentar [Fonte: Sherman et al. (2013)].....	14
Figura 2.12 - Variação da posição de LC segundo o método estatístico NSM e a respetiva divisão da área em estudo por setores (S1 a S9) assinalando-se os valores médios de variação da posição de LC por setor, entre 1967 e 2008 [Fonte: Sousa et al. (2015)]	15
Figura 2.13 - Esquematização dos conceitos de run-up, set-up, zona de rebentação e profundidade de rebentação [Fonte: (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (2022)]	17
Figura 2.14 - Definição das componentes estática e dinâmica do set-up [Fonte: Dean et al. (2005)] ...	17
Figura 2.15 - Localização e magnitude das intervenções de alimentação artificial de praia na faixa costeira de Portugal Continental entre 1950 e 2017 [Fonte: Pinto et al. (2018)].....	20
Figura 2.16 - Distribuição das intervenções de alimentação artificial de praias por magnitude [Fonte: Pinto et al. (2018)].....	20
Figura 2.17 - Distribuição das intervenções de alimentação artificial de praias por objetivo [Fonte: Pinto et al. (2018)]	21
Figura 2.18 - Distribuição das intervenções de alimentação artificial de praias por entidade [Fonte: Pinto et al. (2018)]	21
Figura 2.19 - Padrões de erosão e sedimentação obtidos pelo Delft3D na ilha de Sylt com Roller (a) e sem Roller (b) [Fonte: Dissanayake e Brown (2022)]	23

Figura 2.20 - Padrões de sedimentação/erosão (valores vermelhos correspondem a sedimentação e azuis a erosão). Esquerda: ondas perpendiculares à costa. Direita: ondas oblíquas à costa (30°) [Fonte: van Rijn et al. (2011)]	24
Figura 2.21 - Exemplo de aplicação do Xbeach para 2 de janeiro de 2014, 05:00, na Praia de Cova Gala localizada na Praia da Leirosa	25
Figura 2.22 - Modelo XBeach 2D para a praia de Ostend [Fonte: Bolle et al. (2011)]	26
Figura 2.23 - Padrões 2D de erosão (azul) e sedimentação (vermelho) na praia de Ostend, causados pela tempestade em novembro de 2007 [Fonte: Bolle et al. (2011)]	26
Figura 2.24 - Padrões de erosão (azul) e sedimentação (vermelho) em Elmina (m) [Fonte: Bolle et al. (2011)].....	27
Figura 2.25 - Variáveis da fórmula de <i>Bruun</i> modificada [Fonte: Rosati et al. (2013)]	29
Figura 3.1 - <i>Workflow</i> da metodologia apresentada nesta dissertação	32
Figura 3.2 - Enquadramento Geográfico da Costa Nova	33
Figura 3.3 - Gráfico da precipitação total mensal em mm e da temperatura média mensal em °C na Costa Nova em 2021 [Fonte: https://www.ipma.pt/pt/oclima/monitorizacao/index.jsp?selTipo=m&selVar=rr&selAna=to&selAno=-1].....	34
Figura 3.4 - Carta de Ocupação do Solo na Costa Nova em 2018 [Fonte: Direção Geral do Território (2018)].....	35
Figura 3.5 - A) Localização geográfica do trecho entre São Jacinto e Costa Nova; B) Processo evolutivo do cordão arenoso ao longo dos séculos [Fonte: Souza et al. (2014)].....	37
Figura 3.6 - Carta Geomorfológica - Litoral da Laguna de Aveiro - São Jacinto a Costa Nova em 1958 (A) e 2007 (B) [Fonte: Souza et al. (2014)]	37
Figura 3.7 - Mapa Hipsométrico da região da Laguna de Aveiro [Fonte: Martins (2012)]	38
Figura 3.8 - Laguna de Aveiro e setores da costa (Setor Norte e Setor Sul) - Imagem da banda 4 com expansão linear do contraste tonal. Ampliação do extrato da cena 204/32, (Landsat 7 ETM+) [Fonte: Martins (2012)].....	39
Figura 3.9 - Representação das cartas 1:2000 que englobam a área de estudo	41
Figura 3.10 - Modelo Digital de Terreno da Costa Nova.....	42
Figura 3.11 - Modelo de projeção da subida do NMM Mod.FC_2b (em metros) com os limites de probabilidade de 95% de confiança, sobrepostos por uma função de densidade probabilidade e o NMM em Cascais relativo ao <i>datum</i> vertical de Cascais 1938 [Fonte: Antunes (2019)]	43
Figura 3.12 - Secção de Costa vetorizada	45
Figura 3.13 - Perfis transversais à linha de costa criado pela aplicação Python.....	46
Figura 3.14 - Esquema explicativo das componentes essenciais na criação do ciclo que calcula o recuo da costa segundo a formulação da <i>Bruun</i> modificada desenvolvida em Antunes (2017)	47
Figura 3.15 - Esquema da exemplificação da definição da Linha de Máximo Espraio	48
Figura 3.16 - Linhas de Costa calculados para 2070, 2085 e 2100 comparadas com a linha de costa de 2010	49

Figura 3.17 - Fotografia aérea 3148 do voo 3 da USAF sobre a área correspondente à carta 1:25000 184- Aveiro-Gafanha da Encarnação (Ílhavo).....	51
Figura 3.18 - Enquadramento geográfico da localização dos pontos fotogramétricos medidos no terreno durante o trabalho de campo.....	52
Figura 3.19 - Modelo Digital de Terreno da Costa Nova em 1958	54
Figura 3.20 - Comparação entre as linhas de costa de 2010 obtidas a partir do MDT original (azul) e a partir de dados históricos (vermelho).....	55
Figura 3.21 - Comparação dos perfis nas três secções consideradas, entre 1958 (A) e 2010 (B).....	57
Figura 3.22 - Modelo Digital de Terreno da Costa Nova estimada para 2100, para a seção de costa processada	59
Figura 3.23 - Cenário de Inundação Extrema em 2100 com período de retorno de 100 anos sobre uma topografia de 2100 considerando os efeitos de set-up na zona costeira (A) e desprezando-o nas zonas ribeirinhas (B).....	61
Figura 4.1 - Área de recuo entre a linha de costa atual e a linha de costa de 2100.....	62
Figura 4.2 - Diferença entre o MDT de 2100 e de 2011 na Costa Nova.....	64
Figura 4.3 - Diferença entre o MDT de 2100 e o MDT atual na faixa costeira incluindo a duna	65
Figura 4.4 - Cenário de Inundação Extrema em 2100 com período de retorno de 100 anos sobre uma topografia de 2010 considerando os efeitos de <i>set-up</i> na zona costeira.....	66

Acrónimos

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
BM	Baixa-mar
CIGeoE	Centro de Informação Geoespacial do Exército
CN	Costa Nova
COS	Carta de Ocupação do Solo
DGT	Direção Geral do Território
ETRS89	<i>European Terrestrial Reference System 1989</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LC	Linha de Costa
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
ME	Máximo Espraio
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MSL	Mean Sea Level
NMM	Nível Médio do Mar
PC	Portugal Continental
PF's	Pontos Fotogramétricos
PM	Preia-mar
PT-TM06	Portugal-Transversa de Mercator 2006
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SM	Sobre-elevação meteorológica
sNMM	Subida do nível médio do mar
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
ZH	Zero Hidrográfico

1 Introdução

As mais recentes projeções do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), baseadas em cenários de emissões de gases de efeito de estufa, indicam que a temperatura média global até 2050 pode aumentar 1.9°C, podendo essa diferença de temperatura alcançar os 5°C em 2100, segundo os cenários mais pessimistas (IPCC, 2022). Tal aumento da temperatura poderá afetar os diversos sistemas naturais e humanos na Europa e no mundo. O IPCC, no seu sexto relatório de avaliação (AR6), prevê ainda 4 grandes riscos que deverão ocorrer com o aumento considerável da temperatura e que poderão provocar danos severos na Europa (Bednar-Friedl et al., 2022).

- 1- O número de mortes pode aumentar devido às vagas de calor que se farão sentir pelo continente, já que o potencial de adaptação das populações com os sistemas atuais e num cenário de subida da temperatura de 3°C, é bastante limitado. As vagas de calor deverão levar ao decréscimo dos habitats e ecossistemas marinhos e terrestres e ao aumento das regiões propícias a incêndios.
- 2- Diversas culturas agrícolas podem ser afetadas pelo calor e seca que afetará o continente europeu. Embora exista a forte possibilidade de haver alguns ganhos de novas colheitas no norte da Europa, estes não serão suficientes para compensar as perdas substanciais de produções agrícolas que irão ocorrer ao longo do século no resto do continente.
- 3- Mais de um terço da população do Sul da Europa, onde se inclui Portugal, poderá ficar exposta à escassez de água se a temperatura subir mais de 2°C.
- 4- O risco de inundação costeira pode aumentar 10 vezes mais até ao fim do século, podendo ocorrer mais cedo se forem mantidos os métodos atuais de adaptação e mitigação destes fenómenos.

O risco de inundação costeira é o que se relaciona diretamente ao contexto desta dissertação, pois evidencia o dano que a subida do nível médio do mar (NMM) impõe nas comunidades costeiras. A subida do NMM está associada não só com as inundações costeiras extremas, resultantes de galgamento, como também à intensificação e ao agravamento da erosão costeira e à intrusão de água salgada nos aquíferos costeiros. A frequência de eventos costeiros extremos, conjugando efeitos como sobrelevações meteorológicas (*storm surges*), agitação marítima e marés equinociais, será muito maior e eventos extremos com períodos de retorno de 100 anos, poderão ocorrer com maior frequência (menor período de retorno).

As alterações climáticas estão a alterar não só a frequência de inundações costeiras, como a localização e a intensidade das mesmas, que pode ser exacerbada quando combinadas com chuvas intensas. Tal fenómeno é explicado pelo aquecimento do planeta que potencia este tipo de eventos, visto que o ar próximo da superfície terrestre pode carregar até 7% humidade por cada 1°C de aquecimento (IPCC, 2022).

As alterações da morfologia do terreno das zonas costeiras, têm sido estudadas nos últimos 50 anos, essencialmente através da análise de fotografias aéreas ou de observações diretas nos locais. Em 1987 a União Geográfica Internacional apresentou um estudo que compilou estas observações em todo o mundo e revelou que cerca de 70% das praias a nível mundial estavam a erodir e apenas 10% estavam em processo de acreção (Bird, 1987). Desde então, têm sido publicados diversos outros estudos à escala nacional e continental (e.g. Vousdoukas et al., (2020), Cooper et al., (2008)), que quantificam as variações de sedimentos nas zonas costeiras através da tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). As observações de Bird (1987) nem sempre são corroboradas por outros autores ou estudos, por exemplo, na base de dados da organização europeia *Eurosion* (www.eurosion.org), é

possível verificar a heterogeneidade do comportamento da linha de costa (LC) dependendo da situação geomorfológica do local. Nas praias europeias aferidas por esta base de dados, observa-se que cerca de 30% estão atualmente em erosão enquanto que 60% estão em acreção, o que corresponde a uma situação bastante diferente da descrita por (Bird, 1987) num contexto mais regional.

Em Portugal Continental, no âmbito de projetos como o *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures* (SIAM) de Santos e Miranda (2006), foram desenvolvidos diversos estudos sobre zonas costeiras que definiram o NMM, a modificação do regime de agitação marítima, a sobrelevação meteorológica (SM), a temperatura e a precipitação como as consequências das alterações climáticas que mais afetam o litoral costeiro (Andrade et al., 2006). Todas estas alterações aos ambientes costeiros podem traduzir-se em grandes impactos na faixa costeira, tais como perdas no balanço sedimentar e consequente erosão e recuo da costa, modificação na intensidade e frequência de inundações costeiras, degradação da qualidade da água em estuários, lagunas e aquíferos (Rocha, 2016).

Devido à forte atividade económica, social e demográfica da costa portuguesa, a modelação e acompanhamento da dinâmica costeira é extremamente importante para uma melhor adaptação do território a estas alterações. A avaliação das consequências destes fenómenos e as respetivas implicações nas populações costeiras, é uma mais-valia para a prevenção de danos materiais e humanos nestas regiões. O recuo da linha de costa como consequência das alterações climáticas pode, por isso, trazer uma perda considerável de património e atividade socioeconómica, bem como de habitats e reservas naturais.

Desde o início do século que foram desenvolvidas diversas metodologias para elaborar cenários de recuo da linha de costa para épocas futuras, usando métodos baseados em processos físicos ou usando métodos empíricos. Na maioria dos métodos existentes, baseados em modelos dinâmicos, a estimativa do recuo da linha de costa em cenários futuros é realizada recorrendo a algoritmos que exigem grande poder computacional, onde a capacidade de automatização é diminuta. Alguns destes métodos também não consideraram elementos essenciais nos processos de recuo da costa como o transporte de sedimentos *landward*. Constatadas estas limitações, é imperativo o desenvolvimento de uma metodologia que determine e quantifique, de forma eficaz e automatizada, o recuo da costa causado pelos diversos fenómenos costeiros. Esta metodologia deverá considerar também todos os elementos fulcrais na geração destes fenómenos, de modo a efetuar uma melhor monitorização que conduzirá a uma maior proteção da população e habitats costeiros.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste estudo dividem-se nos seguintes pontos que se organizam de forma sequencial na elaboração do trabalho:

1. Aplicar de forma sistematizada e automática uma metodologia para a determinação do recuo da linha de costa, desenvolvida por Antunes (2017), com recurso a princípios básicos da formulação modificada de *Bruun*. Com base nesta metodologia poder-se-á:
 - Estimar o recuo da LC numa série de horizontes temporais, como consequência da subida do NMM
 - Criar cenários de inundação sobre uma topografia futura, de modo a colmatar as incertezas dos cenários de inundação que utilizam uma topografia presente;
 - Estimar o volume de sedimentos acumulados ou perdidos na área de estudo como consequência do recuo da costa no período temporal considerado;

2. Testar a aplicabilidade da metodologia proposta, numa região costeira de Portugal Continental. Para o efeito selecionou-se a zona da Costa Nova, pois é uma zona que apresenta uma elevada dinâmica sedimentar tendo sido observado um recuo de costa considerável nas últimas décadas (cerca de 2 m/ano entre 1958 e 2010), tal como é referido por Ponte Lira et al. (2016);
3. Estudar a sensibilidade dos parâmetros usados na quantificação do recuo da costa e avaliar a sua influência nos resultados obtidos;
4. Validar a metodologia de cálculo da LC recorrendo à utilização de dados históricos de fotografia aérea, datados de 1958. A partir desses dados deve-se proceder à elaboração de modelos aerofotogramétricos, para posteriormente, através de técnicas fotogramétricas, se determinar a LC na data das fotografias. Posteriormente, pretende-se aplicar a metodologia proposta no ponto 1 e estimar a topografia atual, comparando-a por fim com a topografia real de 2010 da região teste, com origem na tecnologia LiDAR;

1.2 Motivação

A principal motivação desta tese surge da necessidade de se aplicar cenários futuros de subida do NMM com topografia mais próxima do que se estima vir a ser a topografia das zonas costeiras em cenários futuros (2041-2080 e 2071-2100). Com essa topografia pretende-se estimar o recuo da LC com maior fiabilidade, para ciclos climáticos de 30 anos, no âmbito do Roteiro de Adaptação à Alterações Climáticas da Agência Portuguesa do Ambiente (APA). As abordagens paramétricas de quantificação do recuo da costa possuem diversas limitações, principalmente por não considerarem fatores essenciais na dinâmica da erosão costeira. Por exemplo, na fórmula de *Bruun* não é considerado o transporte de sedimentos na direção da costa (*landward*), sendo apenas considerado o transporte de sedimentos no sentido do oceano (*seaward*). Os modelos hidro-morfodinâmicos atuais são muito “pesados” ao nível computacional e exigem um grande volume de dados com um elevado rigor, particularmente informação batimétrica de alta precisão, mas também um modelo de campo de ondas locais para cenários futuros. Sendo que nem sempre é possível o recurso à aplicação de modelos hidro-morfodinâmicos, especialmente à escala regional e muito menos à escala nacional, a abordagem aqui apresentada pretende obter resultados compatíveis, mas reduzindo o tempo de processamento e o esforço computacional. Deste modo é facilitada a replicação da metodologia em outras zonas com diferentes escalas temporais, permitindo escalá-la a nível nacional com a introdução de certos automatismos dentro do fluxo de trabalho. A redução do tempo de processamento e do esforço computacional é possível devido principalmente ao facto de a abordagem apresentada neste trabalho não necessitar de modelar a propagação das ondas e da maré ao longo do espaço e do tempo, utilizando apenas uma caracterização estatística baseadas em valores médios de onda significativa e período da onda. A modelação dos campos de ondas e de maré impõe um elevado tempo de processamento devido à larga quantidade de dados utilizados, restringindo a uma área de aplicação uma região reduzida de modo a tentar minimizar o tempo de processamento. No entanto, uma simplificação e automatização dos processos pode diminuir o rigor dos resultados, devido à generalização e simplificação do modelo que descreve o recuo da costa.

1.3 Contribuição científica

A contribuição científica desta tese passa pela aplicação de uma metodologia proposta por Antunes (2017) para a modelação do recuo da costa, mais simples do que as metodologias baseadas nos processos de hidrodinâmica e morfodinâmica, sendo possível a sua replicação à escala nacional e para diferentes tipos de costa arenosa. O principal contributo da metodologia apresentada nesta dissertação,

passa pela automatização dos processos de aplicação da abordagem de Antunes (2017), e pela integração da metodologia com os diversos Sistemas de Informação Geográfica. Com este trabalho de dissertação, o conhecimento da evolução morfodinâmica da costa portuguesa num futuro próximo, face aos diferentes cenários de subida do NMM, pode ser expandido consideravelmente, permitindo a elaboração de cenários de inundação costeira de épocas futuras com maior rigor e mais realistas, visto que a topografia a considerar será estimada à época referente.

1.4 Estrutura da Tese

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos desde a introdução do trabalho às conclusões sobre a metodologia desenvolvida e aplicada. Os primeiros dois capítulos referem-se à introdução e ao enquadramento do tema da tese, onde são apresentados conceitos importantes, que servem de base teórica para a compreensão da temática deste estudo e onde é elaborada uma análise e revisão do estado da arte neste domínio científico.

No capítulo seguinte apresenta-se a metodologia proposta para se atingirem os resultados pretendidos, sendo efetuada uma descrição detalhada da área de estudo onde será testada, bem como, de todos os procedimentos efetuados no processo de obtenção dos resultados pretendidos. É feita também a validação da metodologia e a análise da sensibilidade dos parâmetros nos resultados obtidos

Nos últimos capítulos, é feita a exposição e discussão dos resultados e são apresentadas as principais conclusões desta dissertação face aos objetivos propostos.

2 Estado do conhecimento atual

Esta dissertação engloba inúmeros conceitos relacionados com o recuo da costa e a subida do nível médio do mar. Como tal, neste capítulo, faz-se uma revisão de vários estudos com enfoque nas alterações climáticas e no seu impacto na subida do NMM e na erosão costeira. Visto que estes temas são bastante complexos e requerem um estudo muito abrangente de diversas áreas do conhecimento, serão apenas exploradas as noções relacionadas com o objetivo essencial desta dissertação, ou seja, a criação e aplicação prática de uma nova metodologia de determinação do recuo da costa. Por essa razão, este capítulo é dividido em duas secções distintas: uma primeira parte sobre a definição de conceitos teóricos subjacentes à erosão costeira e à subida do NMM e uma segunda parte sobre a revisão de métodos para determinação do recuo da costa especificado nos objetivos desta dissertação.

2.1 Conceitos

2.1.1 Referenciais Altimétricos

2.1.1.1 *Datum* altimétrico de Cascais

Em Portugal continental o sistema de referência de altitude ortométrica é definido a partir do *Datum* Altimétrico de Cascais de 1938. Este *datum* é definido a partir da média de observações de nível do mar registadas no marégrafo de Cascais entre 1882 e 1938 e que dá origem ao NMM de Cascais de 1938 (Antunes, 2012). A marca de referência localizada no marégrafo, à qual são referidos todos os registos e observações, é o ponto de partida para o nivelamento geométrico em toda a rede de nivelamento nacional. Ao ser definido um sistema de referência altimétrico, é possível relacionar a altitude de qualquer ponto à superfície terrestre com a superfície de referência e com o ponto à superfície topográfica (*ibid*).

Segundo Antunes (2012), o sistema nacional de referência vertical é definido por um conjunto de altitudes ortométricas, distribuídas por todo o território nacional, e ligadas através de redes de nivelamento geométrico e pela rede geodésica nacional. Qualquer Modelo Digital de Terreno (MDT) em Portugal Continental utiliza o *Datum* de Cascais 1938 como referência altimétrica para as cotas dos pontos.

2.1.1.2 Zero Hidrográfico

Em Portugal, o Zero Hidrográfico (ZH), referencial usado em Hidrografia nas sondagens, na cartografia náutica e nas tabelas de marés, é dado pela mais baixa das Baixa-Mar registadas num período nodal (cerca de 19 anos), com a adição de 30 cm como salvaguarda (o designado pé de piloto) (Antunes, 2012). Em Portugal Continental o valor do ZH é de 2.00 m abaixo do NMM1938 para toda a costa, com a exceção do estuário do Tejo, que se situa nos 2.08 m abaixo do NMM1938. Nas regiões autónomas, devido à baixa amplitude da maré dos oceanos em relação às zonas costeiras e estuarinas, o ZH é de 1.40 m na Madeira e de 1.00 m nos Açores.

Assim, o ZH define o *datum* vertical para a cartografia náutica referindo-se os valores de altura de maré e de profundidade do fundo marinho em relação a este referencial. Para harmonizar as profundidades e as alturas de maré com a informação altimétrica presente na cartografia, é necessário reduzir os valores da altura de maré do ZH específico da região.

2.1.2 Modelo Digital de Terreno

O Modelo Digital de Terreno (MDT) descreve o relevo da superfície terrestre (Redweik, 2021), no entanto, existem várias definições de MDT's com diferenças relevantes: os Modelos Digitais de

Terreno, que descrevem o relevo ao nível do terreno, ignorando o que sobre ele está edificado, ou arborizado; os Modelos Digitais de Superfície (MDS), que descrevem a superfície terrestre com toda as suas edificações e arvoredo; e os Modelos Digitais de Altitude (MDA) e Modelos Digitais de Elevação (MDE), que mais não são que termos genéricos para MDT ou MDS.

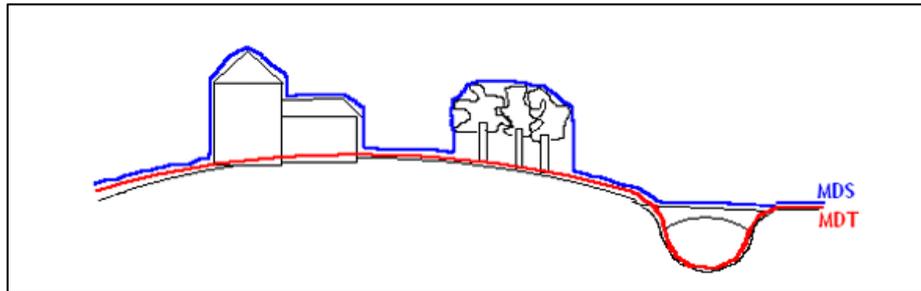


Figura 2.1 - Diferença entre MDT e MDS [Fonte: Redweik, (2021)]

2.1.2.1 Métodos de recolha da amostra primária

Segundo Redweik (2021), a amostra primária de pontos cotados necessária para a elaboração dos MDT's pode ser recolhida pelos seguintes métodos:

- Estereofotogrametria
- correspondência automática de imagens
- LiDAR
- interferometria de radar

Por estereofotogrametria, o operador restitui curvas de nível, perfis ou mede a cota de um conjunto de pontos isolados no modelo estereoscópico do terreno. Tanto é possível recolher uma amostra para um MDT como para um MDS.

A correspondência automática de imagens é realizada por diversos operadores de processamento digital de imagem, cujo objetivo é determinar pontos homólogos em pares estereoscópicos. Como estes operadores se baseiam apenas na informação radiométrica das imagens, a amostra que se obtém poderá apenas gerar um MDS. Amostras obtidas por este método podem ser muito densas.

O LiDAR (*Light Detection And Ranging*) (Figura 2.2) utiliza as propriedades da luz refletida por um pulso laser em direção à superfície terrestre, de modo a obter a distância entre a superfície e a origem do pulso. Essa distância é obtida medindo a diferença de tempo entre a emissão do pulso e a deteção do sinal refletido (Sci-News, 2021). O LiDAR costeiro é o designado LiDAR Batimétrico composto por dois pulsos laser distintos, um com penetração na água (frequência da luz verde) e refletido no fundo marinho, o outro refletido pela superfície da água (frequência da luz vermelha). A diferença de tempo de voo dos dois sinais na receção permite inferir a profundidade da água. Sobre a superfície sólida da Terra, ambos os sinais refletem na mesma superfície e em simultâneo (equivalente ao LiDAR terrestre de um só sinal).

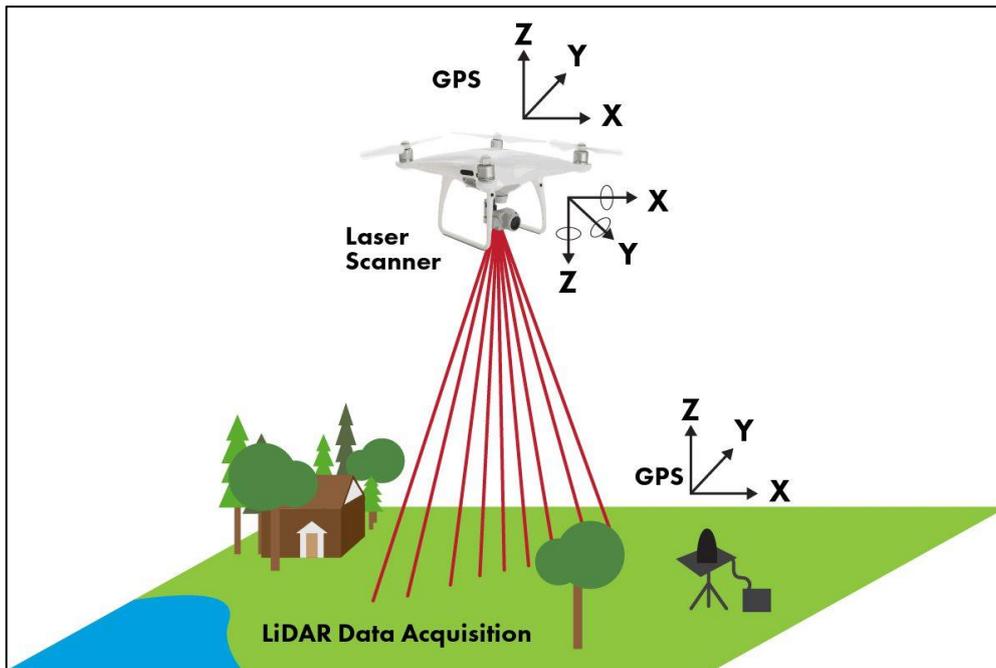


Figura 2.2 - Esquema explicativo do funcionamento do LiDAR [Fonte: <https://flyguys.com/5-industry-use-cases-for-lidar/>]

A interferometria de radar (InSAR) é um método que proporciona amostras para MDS de mais de 80% da superfície da Terra. As suas primeiras versões permitiam uma densidade das amostras de 30 m em determinadas zonas (consideradas de importância estratégica para os Estados Unidos) e de 90 m nas restantes zonas. Atualmente em certas missões como a TerraSAR-X ou a Cosmo-SkyMed é possível monitorizar deslocamentos de até 2.5 cm em grandes cidades sem a necessidade de medições no terreno (insar.sk, 2023). O InSAR é semelhante ao LiDAR, no entanto os sinais transmitidos e recebidos localizam-se na região das micro-ondas do espectro eletromagnético. Este método não funciona bem em zonas densamente urbanizadas devido a problemas de multitrajecto, no entanto, a utilização do radar tem a vantagem de, relativamente aos métodos que não utilizam a radiação micro-ondas (como o LiDAR), poder ser operado mesmo quando existem nuvens na atmosfera (Redweik, 2021).

2.1.2.2 Metodologias de criação de um MDT

Segundo Redweik (2021), o relevo do terreno pode ser descrito de várias formas:

- por curvas de nível que correspondem a linhas de cota constante e orientação variável no plano XY;
- por perfis, bastante utilizados nesta dissertação, que corresponde a linhas de orientação constante no plano XY mas com cota variável;
- por conjuntos de pontos cotados, que podem ser de distribuição regular (grelhas regulares) ou irregular no plano XY,
- por uma superfície contínua que ou é multifacetada (composta por planos de orientação variável, mas adjacentes) ou composta por um conjunto de superfícies de curvatura variável limitadas por figuras geométricas regulares (quadrados, retângulos, hexágonos, etc.)

Existem várias estruturas de dados disponíveis para o auxílio na geração de um MDE, contudo os mais utilizados são o TIN (*Triangulated Irregular Network*) e o GRID. O TIN é gerado através de 3 fases:

- aquisição de uma amostra de pontos cotados, que pode provir diretamente de medições ou indiretamente por curvas de nível ou perfis restituídos.
- geração de uma rede de triângulos cujos vértices são os pontos cotados
- criação de superfícies limitadas pelos triângulos

A criação de uma estrutura TIN segue certos critérios para otimizar a distribuição local e geral dos pontos da amostra, sendo o critério mais comum o de *Delaunay*, onde os triângulos são definidos de modo que um círculo que passe pelos três vértices de qualquer triângulo não contenha nenhum outro ponto da amostra no seu interior (*ibid*).

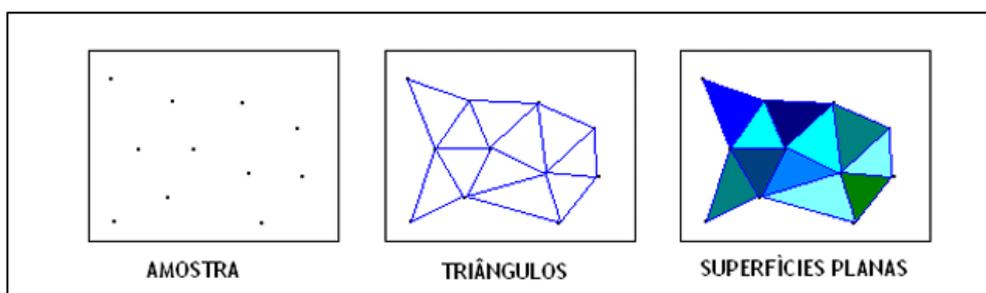


Figura 2.3 - Passos na geração de um modelo TIN [Fonte: Redweik, (2021)]

Para gerar um modelo GRID (grelha regular de pontos cotados) é necessário também adquirir uma amostra de pontos cotados, no entanto, o seguinte passo varia consoante a regularidade da distribuição espacial da amostra de pontos. Caso a distribuição dos pontos seja irregular é criado primeiro um modelo TIN a partir do qual são interpoladas as cotas de pontos regularmente espaçados, gerando o modelo GRID. Caso seja regular, ela própria é utilizada para gerar o modelo GRID. Este modelo pode ser composto ou por células regulares de cota constante no seu interior e igual ao ponto da amostra, ou por uma malha regular cujos nodos são os pontos da amostra (Redweik, 2021).

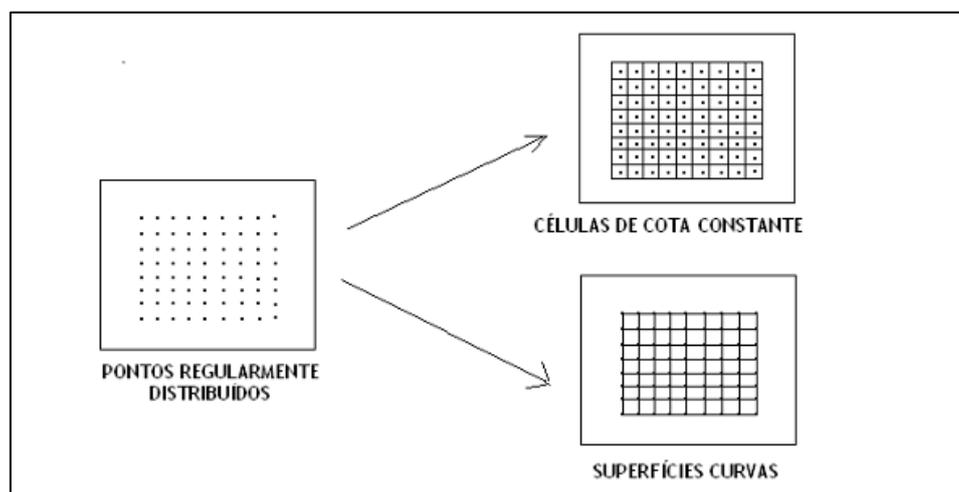


Figura 2.4 - Obtenção de um modelo GRID [Fonte: Redweik, (2021)]

Segundo Redweik (2021) , o modelo TIN tem ainda a vantagem de se adaptar muito facilmente a qualquer tipo de amostra primária, tendo, no entanto, a desvantagem de apresentar uma estrutura muito complexa. Em contrapartida, o modelo GRID apresenta uma estrutura muito simples, mas adapta-se dificilmente a qualquer tipo de amostra primária, obrigando à derivação de uma amostra secundária a partir de um TIN.

Nesta dissertação os MDT's foram gerados através de dados adquiridos com tecnologia LiDAR, numa faixa de aproximadamente 1 km de largura ao longo da costa. Os dados LiDAR foram fornecidos sob a forma de ficheiros ASCII com a lista de pontos localizados na área geográfica de cada folha da carta de escala 1:2000, criando uma malha regular de pontos espaçados de 2 em 2 metros. Utilizando um dos métodos descritos anteriormente é possível criar o MDT das zonas costeiras convertendo a malha de pontos para uma estrutura GRID por atribuição a cada célula do valor altimétrico do respetivo ponto.

2.1.3 Conceitos relacionados com a variação do Nível Médio do Mar

2.1.3.1 Maré

As marés terrestres são produzidas pela atração gravitacional do Sol e da Lua. Segundo a Lei de Gravitação Universal de *Newton*, a atração terrestre por parte dos corpos celestes é diretamente proporcional às massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância. Contudo, no potencial de geração da onda de maré, a proporcionalidade é referente ao cubo da distância (Thurman, 1997). Devido ao facto de a Lua estar consideravelmente mais próxima da Terra que o Sol, apesar de ter muito menos massa, as marés terrestres são mais influenciadas pela atração gravitacional da Lua do que pela atração gravitacional do Sol. A força centrípeta (força de reação à força centrífuga) necessária para manter a translação da Terra, em relação ao centro de massa dos sistemas Terra-Sol e Terra-Lua (dependente da distância entre centros de massa dos astros), é igual em todos os pontos da Terra. Contrariamente, a força da gravidade exercida pela Lua ou pelo Sol varia com a distância entre a posição de cada ponto à superfície da Terra e o astro respetivo (Araújo, 2018a).

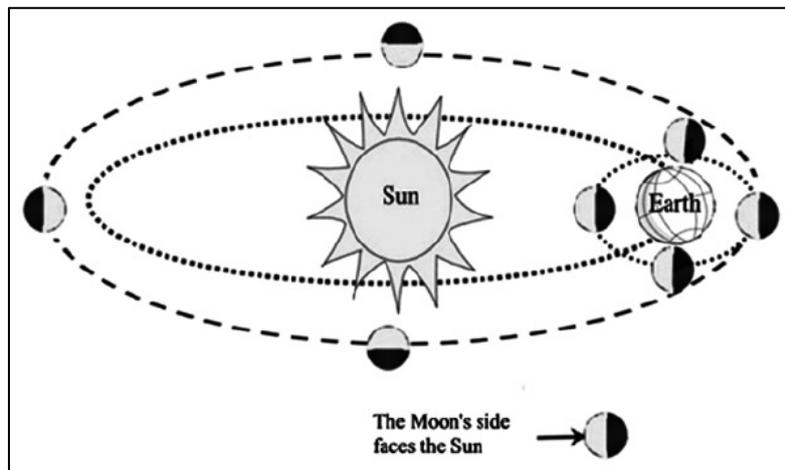


Figura 2.5 - Sistema Sol, Lua e Terra

Elaborando a diferença entre os vetores das forças centrípeta e gravitacional obtém-se a força geradora das marés. Assim, a força geradora da maré cria 2 bojos em lados opostos da Terra, um deles posicionado diretamente em relação à Lua e outro no lado diretamente oposto (Figura 2.6), segundo um plano próximo do plano da eclíptica (divergente do plano do equador). Quando a Lua passa pelo meridiano do lugar dá-se a preia-mar (PM), o momento em que a altura da maré é maior. Contrariamente, com longitude perpendicular ao alinhamento Terra-Lua, ocorre o ponto mais baixo de maré, denominando-se baixa-mar (BM). Devido a diversos atritos, nomeadamente do fundo do mar e os contornos dos continentes, e ainda à necessidade de vencer a inércia, a PM ocorre um pouco mais tarde à passagem da Lua pelo meridiano do local, atraso designado de estabelecimento do porto. Adicionalmente, o intervalo de tempo entre duas passagens da Lua pelo mesmo meridiano (dia lunar) não coincide com as 24 horas do dia solar, havendo um desfasamento de cerca de 50 minutos, relacionado com o movimento de translação da Lua (Araújo, 2018a).

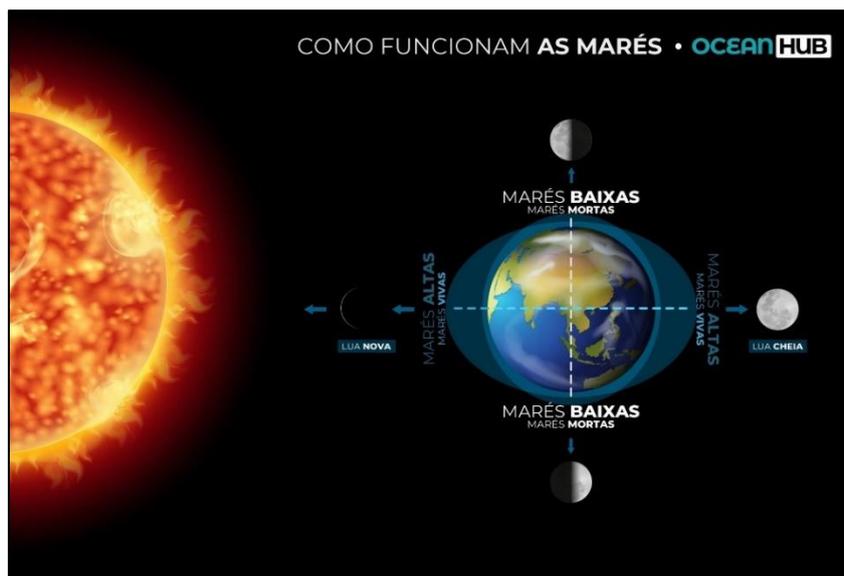


Figura 2.6 - Diagrama explicativo de funcionamento das marés [Fonte: <https://oceanhub.com.br/2020/04/11/o-que-sao-as-marés/>]

Devido à conjugação do movimento de rotação da Terra e as forças de atração gravitacional da Lua e do Sol, o período da onda de maré que percorre aparentemente a superfície da Terra é aproximadamente de 12 horas e 25 minutos, ou seja, de regime semidiurno. Contudo, devido à configuração irregular das bacias oceânicas, em profundidade e em área, nem sempre o regime de maré de um local é do tipo semidiurno. Existem assim, três tipos de marés: as marés diurnas, semidiurna e mistas. As marés semidiurnas, que ocorrem em todo o território nacional, são caracterizadas pela ocorrência de duas PM e duas BM de valores semelhantes no mesmo dia. Devido à variação da posição dos astros durante um mês e às diferentes fases da Lua, as marés apresentam diferentes valores de amplitude - diferença entre a PM e a BM. As marés com maiores amplitudes são as marés vivas (AV – Águas-Vivas) e as de menor amplitude são as marés mortas (AM – Águas-Mortas). Nas marés vivas o Sol e a Lua estão em fase, alinhados em oposição (Lua está cheia) ou do mesmo lado da Terra (Lua Nova), ocorrendo uma maior amplitude de maré especialmente no período dos equinócios (março-abril, ou setembro-outubro). Por outro lado, nas marés mortas o Sol e a Lua estão em quadratura (Lua em fase de Quarto Crescente ou Quarto Minguante), existindo uma contrariedade de influência do Sol nas marés que reduz a amplitude da onda de maré lunar (Instituto Hidrográfico, 2016).

A observação de maré em pontos junto à costa é feita pelos marégrafos, que registam o nível da superfície instantânea do mar em relação a uma superfície de referência (marca de referência – *vertical benchmark*). Esta observação de variação do nível de maré é relativa ao NMM, na forma de elevação de maré, que depois é convertida em altura de maré (variação em relação ao referencial hidrográfico designado de Zero Hidrográfico - ZH). A altura de maré é dada pela soma da elevação de maré com o valor do ZH no local considerado (Antunes, 2012). Assim, o valor da elevação de maré oscila segundo um valor médio, o NMM, sendo os valores positivos máximos correspondentes à fase de PM e os valores negativos mínimos à fase de BM. Por outro lado, a altura de maré é uma grandeza sempre positiva, devido à definição de ZH (a mais baixa das BM registadas num período nodal), exceto em situações extremas de forçamento meteorológico ou outro fenómeno que cause um abaixamento significativo da maré abaixo do ZH (*ibid*).

As tabelas de maré são calculadas a partir de modelos harmônicos de previsão para cada marégrafo, podendo obter-se níveis médios e extremos, de PM e BM, em AV e AM, de forma a caracterizar as

amplitudes anuais de oscilação da maré respetiva. A Figura 2.7 demonstra o modelo de maré astronómica anual para Cascais em 2022, sem considerar a componente de forçamento meteorológica da maré (sobrelevações meteorológicas).

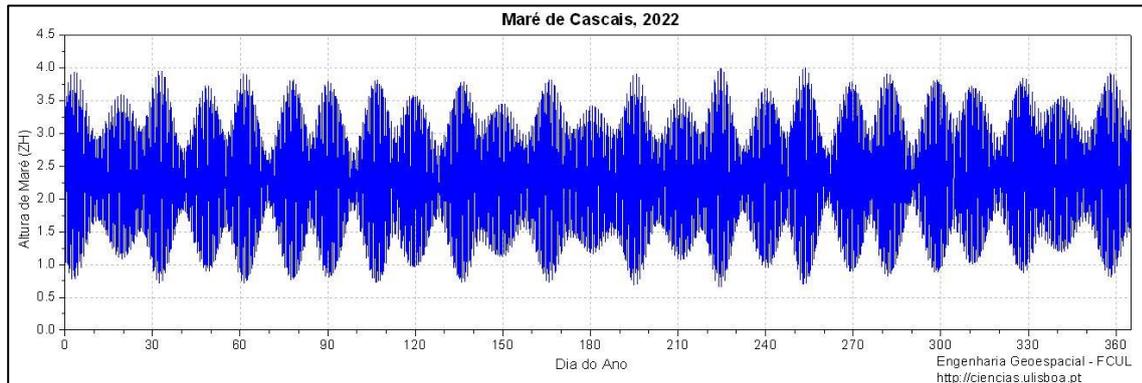


Figura 2.7 - Maré em Cascais em 2022 [Fonte: https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html]

2.1.3.2 Nível Médio do Mar

O nível médio do mar é um conceito com enorme importância para a evolução morfológica das costas, visto que, juntamente com os processos de erosão e de fornecimento de sedimentos, controla a evolução dos litorais, nomeadamente o avanço ou recuo da linha de costa (Araújo, 2018b). É um conceito ligado a uma escala temporal (dia, mês, ano, década ou século) e que se traduz pela média da altura da água do mar relativamente a um ponto de referência e resultante de uma serie de observações num período igual ou superior a 19 anos (período do ciclo completo de revolução dos nodos da orbita lunar, correspondente a 18.6 anos).

Em função dessa escala temporal o NMM pode ser, diário, mensal, anual ou decadal, sendo geralmente considerados o NMM mensal e o NMM anual, para efeitos de análise da sua variação. Com o NMM mensal são eliminadas as interferências devidas às componentes de curto período das marés, da ondulação (ondas gravíticas e infra gravíticas) e do forçamento meteorológico (pressão atmosférica e vento). Considerando-se o NMM anual eliminam-se as oscilações provocadas pela desigual distribuição dos centros de pressão atmosférica, como a consequente variação do regime de vento, ao longo do ano e o efeito sazonal e anual das marés. Há assim um processo de filtragem do registo maregráfico (Silva et al., 2008).

Segundo Titus (1986) e Dias e Taborda (1988), o NMM, numa escala global, depende essencialmente de três fatores: do volume total de água presente nas bacias oceânicas, da temperatura da água a diferentes profundidades e da batimetria das bacias oceânicas. Referem ainda, que esses fatores são modificados principalmente pelos processos glacio-eustáticos, glacio-isostáticos, hidro-isostáticos, tecno-eustáticos, sedimento-eustáticos e os geóido-eustáticos. A visualização do NMM a nível global só foi possível a partir do momento em que se conseguiu observar a terra a partir do espaço, via satélite, possibilitando a identificação das deformações na superfície do geóide (Figura 2.8). O geóide é definido como a superfície equipotencial que seria assumida pela superfície do mar na ausência de marés, variações de densidade da água, correntes e efeitos atmosféricos, oferecendo uma visualização global da variação geográfica do NMM. Contudo, esta superfície equipotencial não representa a superfície média dos oceanos designada por Mean Sea Surface (MSS), que apresenta uma topografia residual (< 1 m) relativamente à superfície do geóide

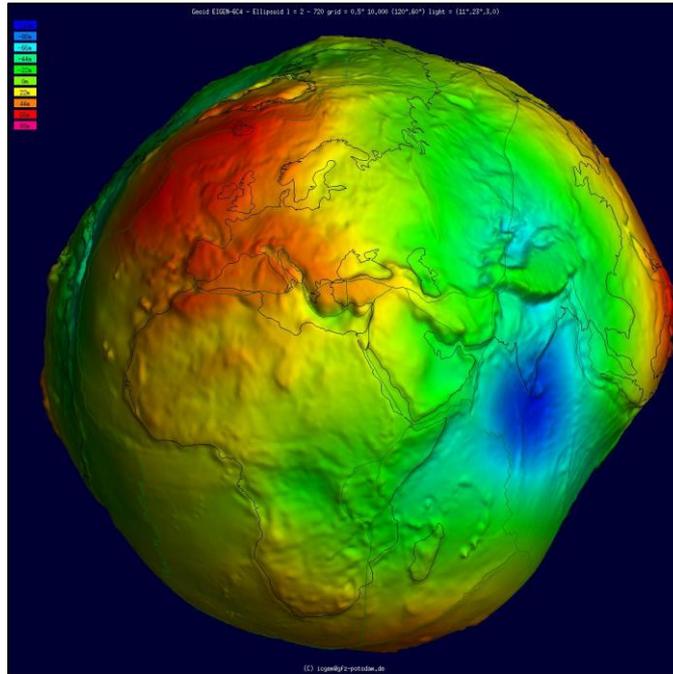


Figura 2.8 - Representação do Geóide [Fonte: <https://www.wikiwand.com/pt/Geoide>]

O NMM global tem verificado uma tendência de subida desde 1880 segundo Church e White (2011). Segundo os dados de altimetria do satélite do centro australiano *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO), a taxa de subida do NMM global desde 1995 de 3.5 mm/ano, enquanto que os dados da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) apontam para 3.4 mm/ano, de acordo com Antunes (2019). Na Figura 2.9 pode-se observar a comparação entre as diferentes taxas de subida do NMM global e do Atlântico Norte.

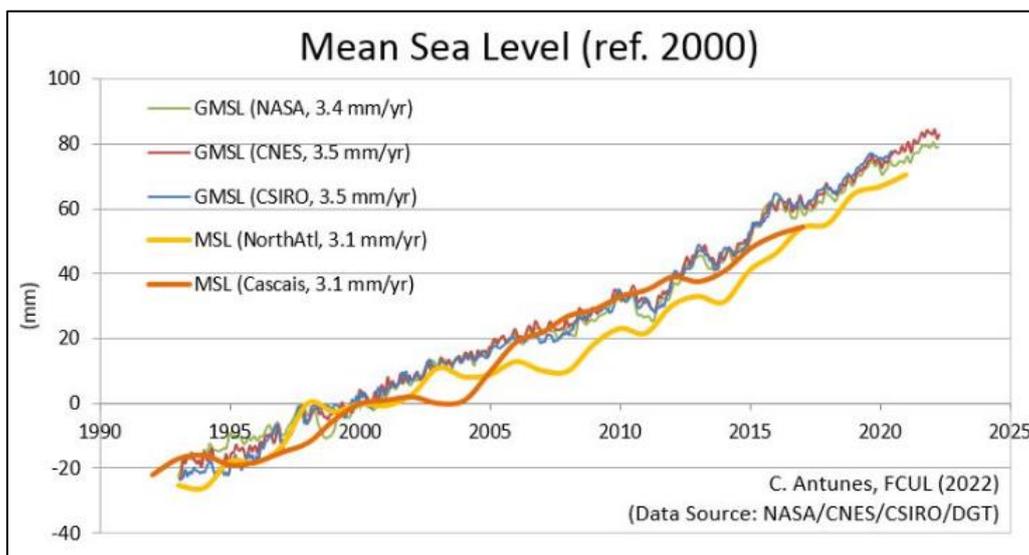


Figura 2.9 - Comparação entre taxas de subida do Nível Médio Mar em relação ao ano 2000 provenientes de diversas fontes [Fonte: https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html]

2.1.4 Erosão Costeira e Recuo da Linha de Costa

A erosão costeira e o conseqüente recuo da linha de costa são influenciados principalmente por dois grandes fatores: o déficit sedimentar e os parâmetros de forçamento costeiro (marés, correntes, sobrelevações meteorológicas e agitação marítima de temporal). Estes fatores diferenciam-se essencialmente pela escala temporal em que a erosão costeira ocorre. O déficit sedimentar ocorre numa

escala temporal maior, de dezenas a centenas de anos, não sendo notado os seus efeitos no dia-a-dia. Pelo contrário, os parâmetros de forçamento costeiro, estão associados a eventos extremos, que provocam elevada erosão na costa num curto período de tempo. A combinação destes dois fatores descreve a erosão que se tem feito sentir nos últimos 60 a 100 anos na costa portuguesa. Para além destes fatores, e numa escala mais longa, temos a variação secular do NMM. A sua subida causa um recuo sistemático da costa, a sua descida causa um prolongamento da costa, tal como se observa em períodos glaciares (de descida do NMM) e interglaciares (de subida do NMM).

Existe um fator adicional, que se destaca dos restantes, por não ser natural, pois procura combater a erosão costeira. As alimentações artificiais de praias, que serão explicadas neste subcapítulo com referência às principais intervenções, procuram reduzir os efeitos da erosão costeira desde meados da segunda metade do século passado, compensando a quantidade de sedimentos que vem sendo perdida devido ao défice sedimentar.

2.1.4.1 Défice Sedimentar

Para poder compreender o conceito de défice sedimentar, é necessário explicar o conceito de balanço sedimentar (*sediment budget*). O balanço sedimentar é definido pela diferença entre o volume de sedimentos que entram numa secção costeira e o volume de sedimentos que abandona a mesma secção (Rosati, 2005). Na Figura 2.10 estão demonstradas as principais fontes e sumidouros naturais, responsáveis pela definição do balanço sedimentar. Uma fonte ou um sumidouro sedimentar pode ser definido como um ponto (no caso da nascente de um rio), ou uma linha (como por exemplo a partir da erosão de uma falésia), sendo que, num contexto global, as fontes de sedimentos geralmente provêm de rios (Davidson-Arnott et al., 2019).

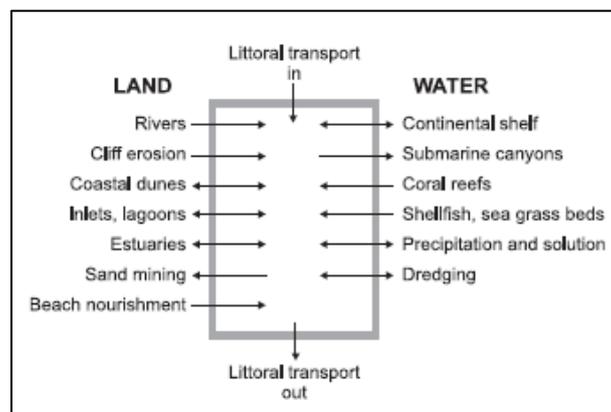


Figura 2.10 - Diferentes fontes e sumidouros responsáveis pelo balanço sedimentar [Fonte: Davidson-Arnott et al. (2019)]

Visto que os sedimentos finos são encontrados em muito pequenas quantidades nas zonas costeiras com mais atividade sedimentar, o balanço sedimentar é quantificado por Rosati (2005) em termos de sedimentos com tamanho maior ou igual a cerca de 0.1 mm. Em situações normais, se o balanço sedimentar num troço de costa for positivo (fontes excedem os sumidouros) então deverá ocorrer o depósito de sedimentos e a linha de costa irá progredir (caso de acreção). Se, contrariamente, o balanço for negativo o troço encontra-se em situação de défice sedimentar e ocorrerá um recuo da linha de costa (caso de erosão). A quantificação do balanço sedimentar num troço costeiro não é simples e muitas vezes passa pela estimativa da ordem de magnitude, pelo ajustamento de variáveis e pela utilização de dados históricos de erosão/acreção ou avanço/recuo da linha de costa (Rosati, 2005).

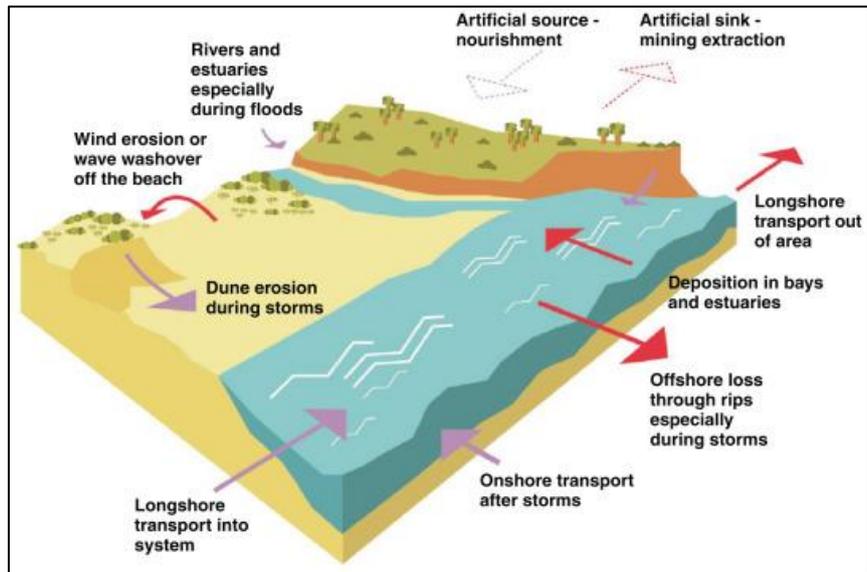


Figura 2.11 - Esquemática da formação de déficit sedimentar [Fonte: Sherman et al. (2013)]

Por exemplo, nos trabalhos de Sousa et al. (2015), verificaram que no trecho costeiro de Caparica-Espichel a evolução da linha de costa ao longo do trecho é caracterizada pela alternância entre setores com evidente déficit sedimentar e setores que registaram acumulação de sedimentos (Figura 2.12). O balanço geral revelou-se ligeiramente acumulativo, já que 56% dos perfis mostraram um comportamento de acreção, tendo os restantes 44% tendências erosivas. Apesar de menos expressivos, os sectores com tendências claramente erosivas encontram-se bem localizados nos limites da área em estudo. O valor de *Net Shoreline Movement* (NSM) médio de 21,6 m de acreção registado nos 41 anos estudados contrasta com o valor de NSM médio de erosão de -12,6 m.

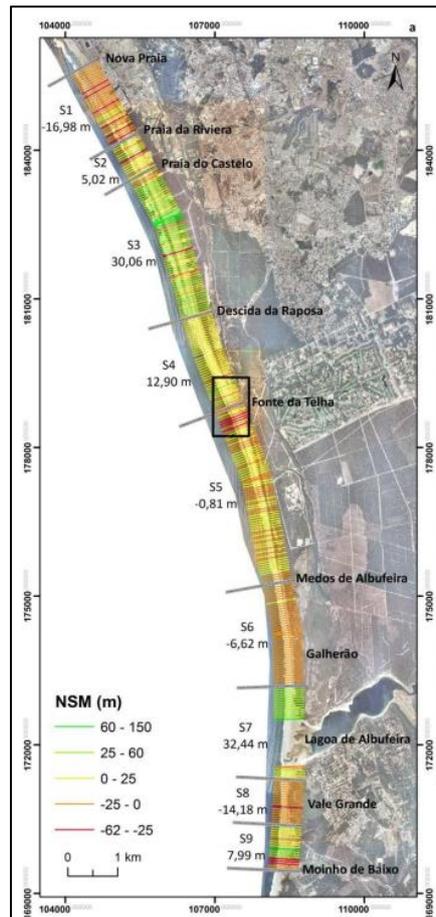


Figura 2.12 - Variação da posição de LC segundo o método estatístico NSM e a respetiva divisão da área em estudo por setores (S1 a S9) assinalando-se os valores médios de variação da posição de LC por setor, entre 1967 e 2008 [Fonte: Sousa et al. (2015)]

2.1.4.2 Parâmetros de Forçamento Costeiro

Aliada ao défice sedimentar, a erosão costeira pode ser exponenciada pela influência dos diversos parâmetros de forçamento costeiro, em particular, a subida do nível médio do mar, a sobrelevação meteorológica e a agitação marítima. Para além da erosão, estes fatores de forçamento potenciam, em certas circunstâncias, o galgamento costeiro, que constitui, a par da erosão, um risco acrescido das alterações climáticas, com o presumível aumento da sua frequência e respetiva amplitude.

- Subida do NMM

A projeção e monitorização da subida do NMM em Portugal Continental é efetuada com a informação oriunda principalmente do marégrafo de Cascais, operacional desde 1882. O marégrafo está localizado à margem da costa, num local com baixa atividade tectónica (Cabral, 1995), baixo ajustamento glacial isostático e com um nível do mar em acordo considerável com os dados globais. Existem vários cenários globais de previsão da subida do NMM, como consequência do aquecimento global (como os mencionados no capítulo anterior), no entanto também existem cenários locais para regiões específicas do globo. Por exemplo, o estudo de Antunes et al. (2019) para o caso particular da costa portuguesa, identifica as zonas costeiras que serão mais afetadas com inundações extremas e inundações frequentes, para a projeção de subida do NMM do modelo Mod.FC_2b, tendo como base uma cartografia probabilística e frequencista de alta resolução. Contudo, os cenários mais comuns e usados são os cenários de subida do NMM do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas

(IPCC), resultantes dos cenários RCP, em particular, o cenário RCP8.5 que aponta como estimativa central, uma subida de 74 cm do NMM durante o séc. XXI (IPCC, 2022).

A subida do NMM pode potenciar a inundação em certas zonas costeiras e será particularmente visível nos locais em que a morfologia apresenta cotas relativamente baixas. Os estudos efetuados para a generalidade do espaço europeu por Nicholls et al. (2007) e Nicholls et al. (2009) indicam um elevado risco de inundação costeira em todos os cenários de subida do nível do mar sendo crescente com o tempo.

- Agitação Marítima

A agitação marítima pode ser caracterizada por ondas, vagas, seichas e tsunamis, sendo considerada nesta disserta o apenas a agitação das ondas geradas pelo vento de tempestade ao largo da costa (ondas de *swell*). Uma onda, no contexto geral, define-se por uma perturba o de tipo oscilatório que se propaga através de um meio (líquido, sólido ou gasoso), correspondendo, por norma, a uma transferência de energia. No contexto de agitação marítima, as ondas marinhas são ondas mecânicas superficiais, que transferem energia (perturba es) através da  gua. Essa energia é transmitida ao oceano pelo vento (como   o caso das ondas que se vêm rebentar na praia), pela força gravítica da Lua e do Sol, por um evento sísmico ou qualquer outro processo que provoque modifica o brusca do fundo marinho (caso dos tsunamis) (Sistema Nacional de Informa o de Recursos Hídricos, 2022).

Quando uma onda entra na zona de rebenta o, devido à rápida diminui o da profundidade, a altura aumenta até que o declive da onda atinge o valor limite. Como em águas pouco profundas a velocidade da onda   fun o da profundidade, essa velocidade vai diminuindo à medida que a profundidade diminui. Como o fluxo energético tem de se manter constante, a altura da onda (proporcional à sua energia) vai progressivamente aumentando. A profundidades muito baixas, a diferença de velocidade entre a crista da onda (onde a profundidade   maior) e a cava da onda (que se propaga a profundidade menor)   significativa e aumenta constantemente, por forma que a crista da onda avança sobre a cava, onde não existe sustenta o e, conseqentemente, rebenta (Sistema Nacional de Informa o de Recursos Hídricos, 2022). A forma como a onda rebenta (tipo de rebenta o)   fun o, essencialmente, do pendor da praia e da declividade da onda.

A caracteriza o da agitação marítima é feita geralmente de acordo com os valores relativos à altura significativa da onda (H_s), que correspondem à média do terço mais elevado das alturas de onda de zero ascendente. É feita também de acordo com o período médio da onda (T_{HS}), que indica a média dos períodos das ondas que foram utilizadas no cálculo da altura significativa, e de acordo com o período de pico (T_p), que corresponde ao período que indica a frequência com maior densidade espectral e   representativo das ondas mais energéticas. Por fim, a agitação marítima caracteriza-se também pelas respetivas dire es associadas ao período de pico D_{TP} (Coelho, 2005).

Nos trabalhos de Costa et al. (2001) registou-se uma altura média mensal da onda significativa entre 1.1 m a 2.8 m nos registos das boias ond grafos da Figueira da Foz e Sines e entre 0.6 m e 1.5 m para Faro. As dire es da agitação marítima, D_{TP} , são predominantemente de Noroeste para as regiões na costa Oeste portuguesa, com algum acréscimo de Oeste no inverno, e de Oeste na costa Sul do Algarve. Carvalho e Barceló (1966), verificam que na costa ocidental portuguesa, as alturas significativas mais frequentes são de 1 m a 2 m, com 45% das ocorrências, sendo o máximo registado de 11 m, o que não significa que não ocorram máximos superiores em episódios de temporal. A frequência de H_s superiores a 3 m corresponde a 15%, de apenas 2% para alturas superiores a 6 m e 6% para os períodos de calma. Os valores máximos mensais das alturas significativas mostram uma variabilidade acentuada, verificando-se valores de 11 m em dezembro e janeiro, e de 4 m em julho. Os

valores mais frequentes de período significativo da onda variaram entre os 9 s e os 11s, sendo o valor mínimo observado de 6 s e o máximo de 18 s.

Outros conceitos importantes no contexto da agitação marítima são os efeitos de *run-up* e o *set-up*. O *run-up* (R na Figura 2.13) corresponde ao nível atingido pela água na praia após a rebentação da onda. Por outras palavras, o *run-up* é a distância vertical entre o ponto mais elevado atingido pelo espraio da onda e o nível da maré nesse momento.

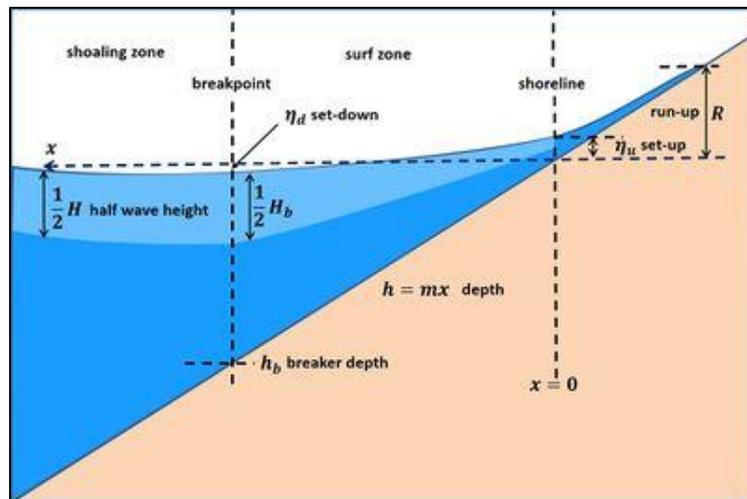


Figura 2.13 - Esquemática dos conceitos de run-up, set-up, zona de rebentação e profundidade de rebentação [Fonte: (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (2022))]

O *set-up* de uma onda (μ_u), consiste simplesmente na elevação da maré na costa (*shoreline*) devido ao efeito de empilhamento causado pela rebentação da onda na zona de rebentação (*surf zone*) (Bowen et al., 1968). Inclui uma componente estática e uma componente dinâmica, a componente estática corresponde ao valor médio de *set-up* no período considerado, e a componente dinâmica à oscilação do *setup* (Figura 2.14) (Dean et al., 2005). O *set-up* (dinâmico + estático) é uma das componentes do *run-up* total juntamente com o *run-up* incidente ($R - \mu_u$).

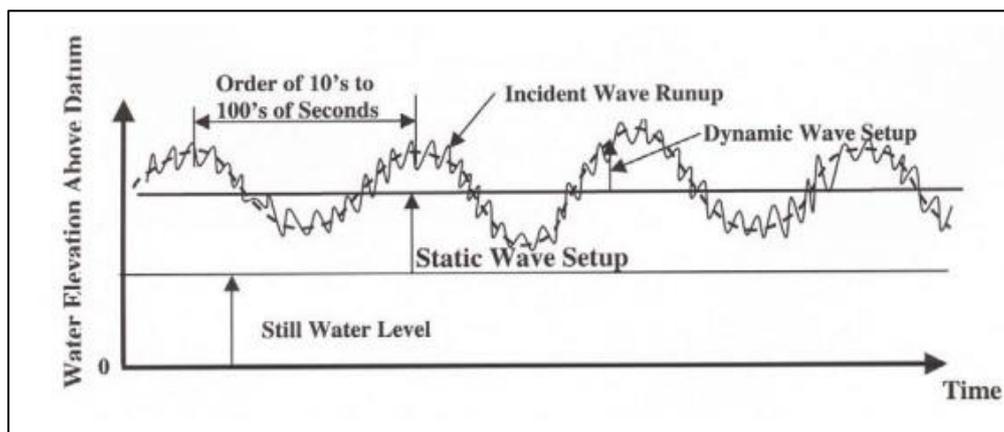


Figura 2.14 - Definição das componentes estática e dinâmica do set-up [Fonte: Dean et al. (2005)]

-Sobrelevação meteorológica

A sobrelevação meteorológica (SM), cuja designação em inglês é *storm surge*, é um forçamento atmosférico que resulta da força do vento e do efeito barométrico inverso que influencia o nível do mar relativamente ao nível da maré prevista (maré astronómica) (Andrade et al., 2006). A SM é variável de local para local e ao longo do tempo, sendo possível a sua estimativa através da análise harmónica dos registos horários de maré. A SM pode tomar valores positivos e negativos, sendo que

quando é positivo e coincidente com um período de preia-mar de águas-vivas, pode originar episódios extremos de galgamento e de inundação costeira.

Em Portugal, de acordo com estudo atualizados utilizando a metodologia de Vieira et al. (2012) baseada na análise de dados de galgamento costeiro na costa portuguesa entre 1960 e 2018, a SM máxima observada ao longo da costa oeste de Portugal Continental registou valores médios variantes entre os 50 e os 70 cm nas diversas estações de medição do galgamento, e valores máximos entre os 80 cm e 1 m para períodos longos (mais de 100 anos) (Antunes et al., 2019). O valor máximo detetado por análise harmónica foi 82 cm em Viana do Castelo a outubro de 1987 e 83 cm em Lagos no dia 4 de março de 2013 explicado pelo possível efeito acumulado de *set-up* adicional devido à localização da estação e à direção dos ventos e da agitação marítima de sudoeste.

A sobrelevação meteorológica é tradicionalmente definida com períodos de retorno, obtidos utilizando a análise de máximos de eventos de sobrelevação meteorológica numa série longa, utilizado a distribuição de *Gumbel* simples para valores extremos (Al-Mashidani et al., 1978). Através da técnica de partição do intervalo, denominada por *bootstrapping* (Davison e Hinkley, 1997), é possível identificar tendências nos períodos de retorno. A técnica de *bootstrapping* consiste numa análise sucessiva com diminuição progressiva do intervalo de análise, convergindo sucessivamente para períodos mais recentes (Vieira et al., 2012).

-Tempestades

Existem diversos tipos de tempestades normalmente categorizadas pelas velocidades máximas que os ventos são capazes de produzir. São notoriamente classificadas segundo a escala de *Saffir-Simpson hurricane wind scale* (SSHWS) (National Hurricane Center, 2022) que classifica principalmente os ciclones tropicais numa escala de 1 a 5, mas também as tempestades tropicais com a sigla TS e as depressões tropicais segundo a sigla TD (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Classificação de ciclones e tempestades tropicais segundo a Saffir-Simpson hurricane wind scale [Fonte: National Hurricane Center (2022)]

Categoria	Ventos sustentados	Descrição
5	≥ 252 km/h	Ciclone que causará danos catastróficos
4	209 a 251 km/h	Ciclone que causará danos catastróficos
3	178 a 208 km/h	Ciclone que causará danos devastadores
2	154 a 177 km/h	Ciclone que produzirá ventos extremamente perigosos que podem causar danos extensivos
1	119 a 153 km/h	Ciclone que produzirá ventos bastante perigosos que podem causar alguns danos
TS	63 a 118 km/h	Tempestades tropicais
TD	≤ 62 km/h	Depressões tropicais

A costa atlântica portuguesa é assolada normalmente por dois tipos de tempestades tropicais, as subtropicais (ou pós tropicais) vindas do quadrante sudoeste e as extratropicais provenientes do quadrante noroeste (Rogers, 1997). As tempestades extratropicais desenvolvem-se nas latitudes médias, 30 a 60°, e são caracterizados por um núcleo frio, ventos fortes e chuvas moderadas a torrenciais (Gulev et al., 2001). As tempestades extratropicais do Atlântico Norte desenvolvem-se de Oeste para Este, e devido aos seus fortes ventos geram agitação marítima de elevada energia (*swell*)

que atinge com maior frequência a costa britânica, o norte da Europa e por vezes também o norte da Península Ibérica, devido à deriva para sul do *swell* (Antunes, 2014). As tempestades subtropicais geram-se geralmente em zonas tropicais, transportam massas de ar quente e caracterizam-se por um centro de baixas pressões, um núcleo quente, sem sistemas frontais associados e ventos fortes localizados mais longe do centro (Evans and Guishard, 2009). São sistemas cavados que originam, normalmente, sobrelevações meteorológicas elevadas na costa portuguesa e atingem, predominantemente, a Península Ibérica de sudoeste (Antunes, 2014). A sobre-elevação meteorológica e a forte agitação marítima de elevada energia são os dois tipos de eventos extremos que têm origem nestes dois tipos de tempestades, subtropicais e extratropicais, e estão associados a elevado risco de, respetivamente, erosão e galgamento nas zonas costeiras e inundação das zonas ribeirinhas (*ibid*).

2.1.4.3 Intervenções de proteção costeira

De modo a colmatar os efeitos da erosão costeira causados, quer pelo défice sedimentar, quer pelos parâmetros do forçamento costeiro, são regularmente criadas infraestruturas de proteção costeira que consistem em intervenções para proteger a costa do efeito erosivo ou da perda sedimentar. As intervenções de proteção costeira mais utilizadas em Portugal são a alimentação artificial de praias e as obras “pesadas”. Enquanto a primeira consiste na deposição de grandes quantidades de areia na berma da praia emersa, promovendo o seu alargamento no sentido do mar e favorecendo o seu robustecimento volumétrico e altimétrico, as obras pesadas prendem-se pela construção de grandes estruturas como esporões, quebra-mares, obras longitudinais aderentes (paredões) e molhes. Ao contrário das obras “pesadas”, as alimentações de praia são concebidas para dar uma resposta dinâmica, mais natural e flexível, compatível com a sazonalidade inerente ao sistema natural e à taxa de défice sedimentar (Hamm et al. (2002); USAID, (2009)).

Vale a pena referir que é normalmente considerado e categorizado como alimentação artificial qualquer operação que envolva o depósito de sedimentos arenosos (areia com granulometria fina, média, grosseira) na faixa costeira compreendida entre os -10 m de profundidade ZH até à alta praia (+10 m ZH).

Nas últimas décadas a alimentação artificial tem sido preferida em Portugal e quase todo o mundo. Para além da flexibilidade referida anteriormente, quando existem sedimentos disponíveis, a alimentação artificial providencia uma maior proteção contra os fenómenos de galgamento oceânico (e eventual inundação) e minimiza os efeitos erosivos causados por temporais sobre a linha de costa e danos a estruturas ali construídas. Esta capacidade de proteção é principalmente motivada pela maior eficácia das alimentações artificiais em dissipar a energia das ondas comparativamente com as estruturas artificiais pesadas. Além disso as alimentações de areia possuem um efeito de proteção imediato (Martins and Veloso-Gomes, 2011), permitindo rapidamente recriar a morfologia do sistema praia-duna, ao contrário das estruturas de defesa costeira pesadas, cujos efeitos colaterais e reversos (intensificação da erosão a sotamar) começam ao fim de algum tempo a ser sentidos. No contexto das alterações climáticas, segundo USAID (2009), a alimentação de praias revela-se como uma das mais importantes medidas para minimizar ou reverter os fenómenos de erosão costeira e de galgamento que previsivelmente se virão a agravar num futuro próximo devido à subida do NMM e ao aumento da intensidade dos temporais extremos.

Entre 1950 e 2017 foram identificadas pelo relatório da Agência Portuguesa do Ambiente, 134 operações de alimentação artificial de praia em Portugal Continental (Figura 2.15). Cerca de 67% dessas intervenções foram efetuadas na costa Ocidental e os restantes 33% na costa sul do Algarve. Foram depositados na faixa costeira um total de 33,7 milhões m³ neste período. Mais de metade das alimentações artificiais de praia tiveram como objetivo a melhoria das condições de estabilidade da

linha de costa, enquanto 30% das intervenções visaram o aumento da largura da praia para uso balnear/recreativo (Figura 2.17). A areia depositada durante a alimentação artificial das praias provém de três tipos de manchas de empréstimo: dragados das zonas portuárias (canais, marinas, cais e portos de abrigo), que consistem em 88% das manchas de empréstimo utilizadas; plataforma continental próxima, que correspondem a 10%; e praia imersa/emersa (para promoção da transposição sedimentar no litoral – *bypass*), correspondentes a 2% das manchas de empréstimo (Pinto et al., 2018).

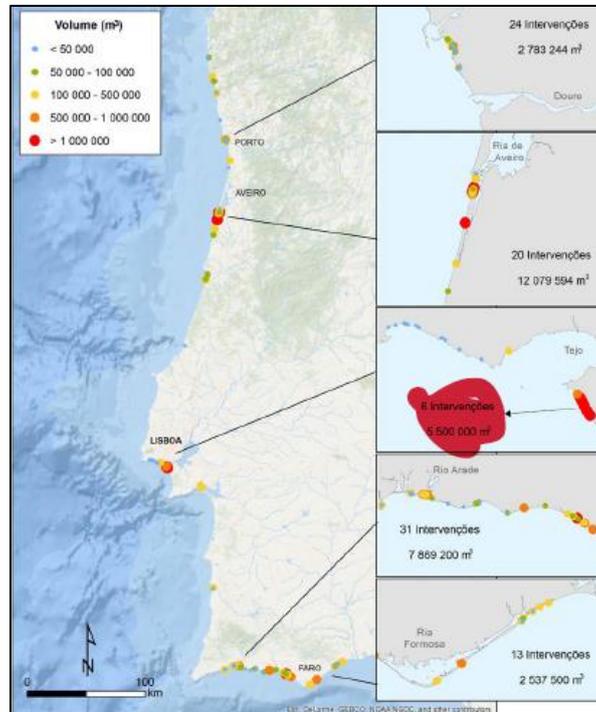


Figura 2.15 - Localização e magnitude das intervenções de alimentação artificial de praia na faixa costeira de Portugal Continental entre 1950 e 2017 [Fonte: Pinto et al. (2018)]

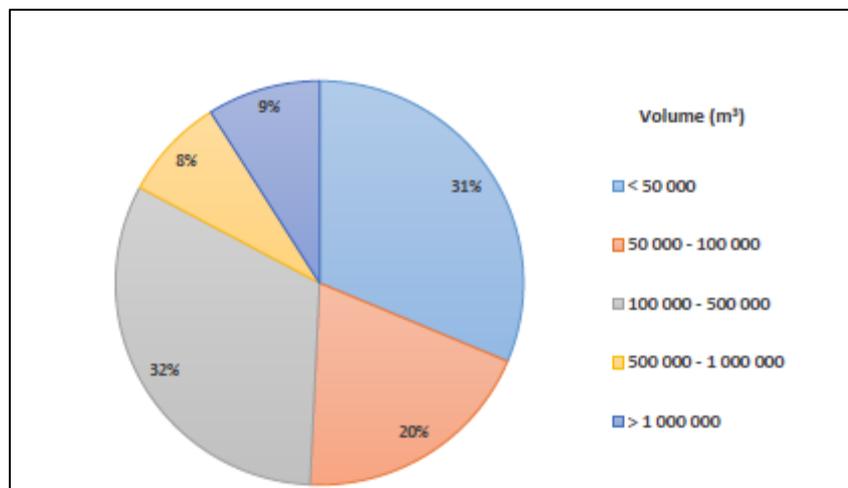


Figura 2.16 - Distribuição das intervenções de alimentação artificial de praias por magnitude [Fonte: Pinto et al. (2018)]

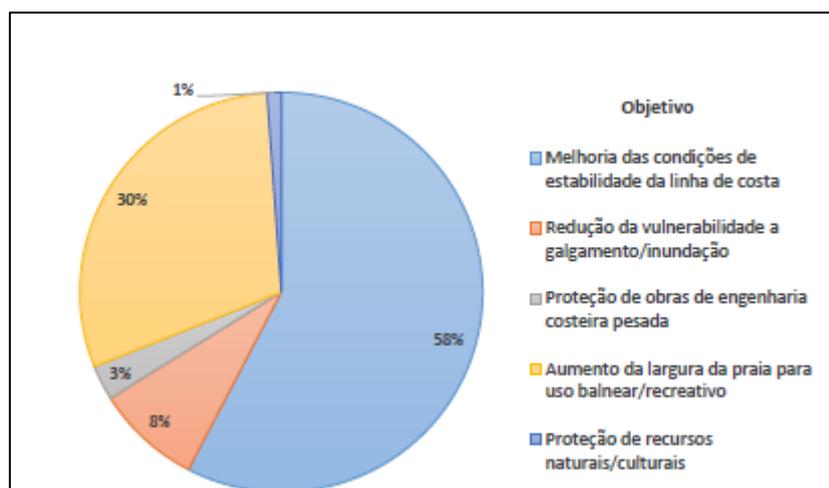


Figura 2.17 - Distribuição das intervenções de alimentação artificial de praias por objetivo [Fonte: Pinto et al. (2018)]

No Algarve, entre Lagos e Olhos D'Água (Albufeira), as condições de agitação marítima de baixa energia aliada à morfologia local favorecem a concretização das alimentações de praia como medida privilegiada de proteção costeira. No litoral Ocidental, apesar das condições de agitação marítima de alta energia, elevado grau de exposição e intensa atividade portuária, as intervenções de alimentação foram justificadas maioritariamente pela necessidade da mitigação dos impactos da atividade portuária utilizando os sedimentos decorrentes da dragagem (Pinto et al., 2018).

Os principais promotores/responsáveis dessas intervenções são os portos/Administrações Portuárias (62%), o Ministério do Ambiente 32% e operadores privados ou municípios- 6% (Figura 2.18).

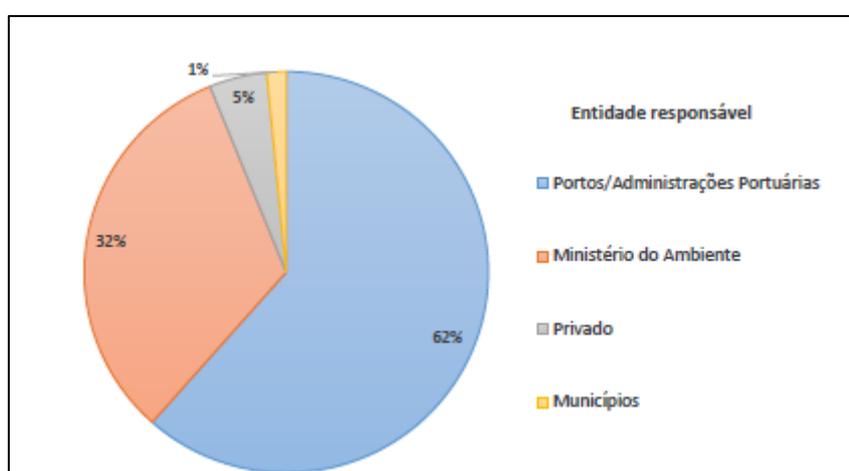


Figura 2.18 - Distribuição das intervenções de alimentação artificial de praias por entidade [Fonte: Pinto et al. (2018)]

2.2 Revisão e análise da bibliografia

Neste subcapítulo serão abordadas técnicas e métodos que procuram mapear e quantificar o recuo da costa. A maioria destes métodos são aplicados ou com recurso a formulações de processos físicos, como a subida do nível médio do mar e a agitação marítima, ou a formulações puramente matemáticas que não se ajustam à realidade dos processos físicos que englobam o recuo da costa. Nesta secção será feita uma revisão dos principais métodos usados para este efeito, e será realizada uma análise comparativa entre dois tipos: os **métodos baseados em processos** e os **métodos paramétricos**.

Os métodos baseados em processos são bastante mais complexos do que os métodos paramétricos, pois utilizam formulações matemáticas que descrevem um processo natural e que geralmente contém

bastantes constrangimentos e um elevado número de parâmetros. São normalmente utilizadas equações diferenciais devido à natureza irregular dos processos naturais. Além disso, são métodos que requerem um maior poder de computação e tempo, requerendo uma grande quantidade de dados com elevada resolução espaço-temporal e elevado rigor, como sejam, a topo-batimetria, e campos de ondas de um longo período de análise (mínimo 1 ano, mas pode ser necessário 10 ou 30 anos de dados). No caso do recuo da costa estes métodos estão associados a modelos hidro-morfodinâmicos que modelam a hidrodinâmica da variação do nível do mar (maré e NMM) e das ondas de agitação marítima.

Os métodos paramétricos podem subdividir-se em dois grupos consoante o nível de ajuste aos dados disponíveis sobre o fenómeno que procuram descrever: os **métodos empíricos**, que não efetuam qualquer ajuste aos dados naturais nem exprimem qualquer realidade física, procurando apenas prever o fenómeno com métodos exclusivamente matemáticos, computacionais e probabilísticos; e os **métodos semi-empíricos**, que utilizam formulações matemáticas para descrever o fenómeno natural (exprimem de certo modo a realidade física), contudo são implicitamente ajustados a alguns dados que ajudam a descrever o fenómeno.

Devido à sua natureza mais teórica, não existem aplicações práticas relevantes para os métodos empíricos, sendo a larga maioria das aplicações baseadas em métodos semi-empíricos.

2.2.1 Métodos baseados em processos

Existem diversos métodos baseados em processos que procuram descrever e modelar a erosão costeira e o recuo da linha de costa. Estes métodos podem ser mais específicos para determinados ambientes costeiros e hidrológicos, ou mais generalizados para poderem ser aplicados em diferentes situações. Neste subcapítulo serão apresentados 3 exemplos de métodos baseados em processos, sendo expostos casos de estudo apenas para os dois primeiros. Os métodos que serão abordados são o Delft3D, o XBeach e o Q2Dmorfo.

2.2.1.1 Delft3D

O Delft3D é um sistema de modelação hidro-morfodinâmico 3D desenhado para simular propagação de ondas, correntes, transporte sedimentar, desenvolvimentos morfológicos e qualidade da água em ambientes costeiros, estuarinos e em rios (Roelvink and Van Banning, 1994). É composto principalmente por um módulo hidrodinâmico (FLOW), um módulo morfodinâmico (MOR) e um módulo de ondas (WAVE), todos disponíveis em código aberto desde 2010. O módulo FLOW é o núcleo do Delft3D, sendo um simulador hidrodinâmico, pois calcula o transporte e o fluxo resultante de fenómenos meteorológicos e de marés. O módulo MOR, no entanto, computa o transporte sedimentar e as alterações morfológicas. As correntes e as ondas agem como as principais forças sendo incorporadas no modelo uma grande variedade de funções de transporte. O módulo MOR tem a vantagem de comunicar com os módulos FLOW e WAVE permitindo o ajuste das correntes e das ondas à batimetria local à medida que vai sendo alterada, facilitando simulações em qualquer escala temporal, desde dias (no caso de tempestades) a séculos (sistemas dinâmicos).

O módulo WAVE é usado para simular a propagação das ondas *offshore* para *nearshore*, permitindo considerar os efeitos das alterações da batimetria local enquanto a ondulação se aproxima da costa, usando um conjunto de dados batimétricos de alta resolução (Dissanayake e Brown, 2022).

A aplicação do Delft3D pode ser usada em diversos cenários em que é necessária a modulação das alterações ambientais de sistema hidrodinâmicos como praias, rios e estuários. No estudo de

Dissanayake e Brown (2022) foram modelados os efeitos da erosão com e sem *Roller wave Dynamics*¹ de uma região costeira na ilha de Sylt, ao largo das costas da Alemanha e da Dinamarca. Neste artigo, os efeitos da erosão na região foram modelados pelo Delft3D e pelo XBeach, cujos resultados estão apresentados mais à frente neste trabalho. Visto que o Delft3D é um método baseado em processos dinâmicos, é necessária a calibração do modelo, através das comparações dos resultados da modelação com medições no terreno (com registos históricos, por exemplo). As medições corresponderam a valores de nível da água e de condições de vento num determinado período, de 4 meses para o estudo feito pelos autores que incluiu uma tempestade considerável. A calibração do Delft3D apenas utiliza as capacidades de modelação hidrodinâmicas (correntes e ondas correspondente ao módulo FLOW) e apenas após a calibração são incluídas as capacidades de modelação da erosão.

Para comparar os resultados obtidos pelo modelo e as medições no campo, nesse estudo, foram calculados parâmetros estatísticos como o coeficiente de correlação (R^2) e o erro médio quadrático (RMSE). O Delft3D revelou um R^2 de qualidade, na ordem dos 0.91, e um RMSE de 0.14 m, o que demonstra a alta capacidade deste modelo em reproduzir os dados observados no terreno. Em relação à modelação da hidrodinâmica com e sem o efeito *Roller*, o Delft3D verificou um aumento da hidrodinâmica na área próxima da costa quando foi ativado o *Roller*, juntamente com uma maior atividade morfodinâmica. Os resultados observados levaram os autores a concluir que o modelo Delft3D, aliado à consideração do efeito de *Roller*, é adequado para a investigação da dinâmica morfológica e hidrológica das regiões *nearshore*.

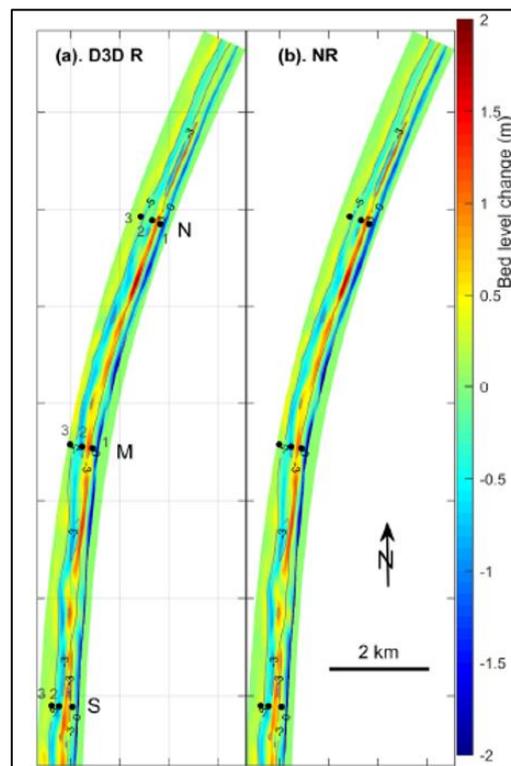


Figura 2.19 - Padrões de erosão e sedimentação obtidos pelo Delft3D na ilha de Sylt com Roller (a) e sem Roller (b) [Fonte: Dissanayake e Brown (2022)]

¹ Roll waves são distúrbios semelhantes a choques de grande amplitude que se desenvolvem em fluxos de água turbulentos. São ocorrências comuns em condutos artificiais como aquedutos e são comumente reproduzidos em calha de laboratório. Embora sejam frequentemente encontradas em cursos de água artificiais, as Roll waves também são observadas em fluxos naturais, como canais de gelo. (Balmforth e Mandre, 2004)

Nos trabalhos de van Rijn et al. (2011) o Delft3D foi testado em três diferentes escalas em praias com declives causados por ataques de ondas. As três diferentes escalas foram definidas segundo a dimensão das praias. A calibração foi feita usando dados de medições de altura de ondas que, tal como no exemplo de aplicação anteriormente demonstrado, se revelaram bastante semelhantes aos dados obtidos pela modelação do Delft3D, neste caso na ordem dos 10 a 15% de diferença. Embora tenha simulado a erosão das praias nas 3 diferentes escalas, o modelo sobrestimou sistematicamente a erosão na parte superior da praia, relacionado com o procedimento aplicado nas zonas secas. Esta sobrestimação é também responsável pela diferença de qualidade de previsão do modelo em situações de acreção quando comparados com situações de erosão. Os resultados em situações de acreção da praia, revelaram resultados muito menos satisfatórios.

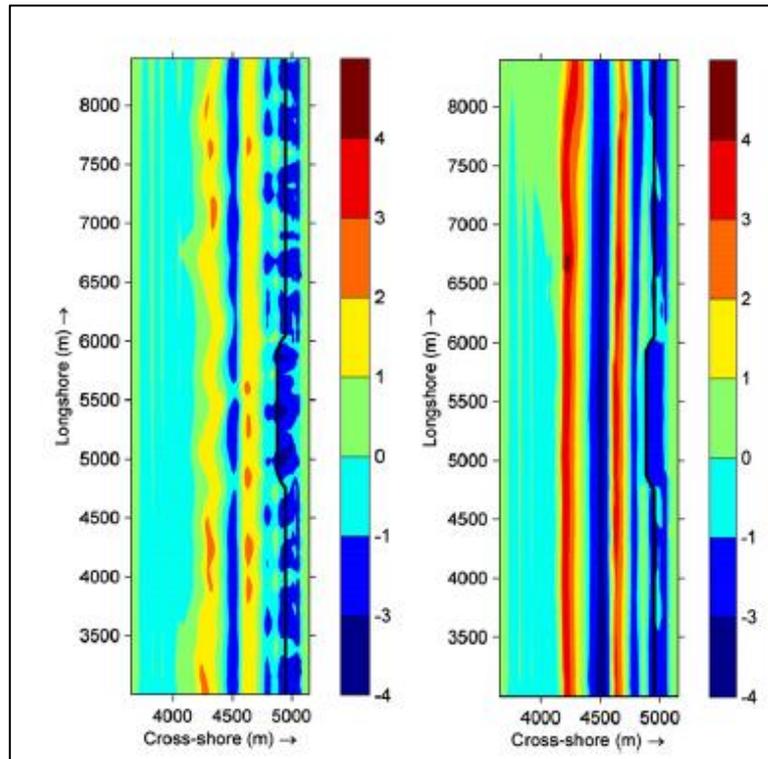


Figura 2.20 - Padrões de sedimentação/erosão (valores vermelhos correspondem a sedimentação e azuis a erosão). Esquerda: ondas perpendiculares à costa. Direita: ondas oblíquas à costa (30°) [Fonte: van Rijn et al. (2011)]

2.2.1.2 XBeach

O XBeach (Roelvink et al., 2009) é um modelo bidimensional de propagação de ondas, transporte sedimentar e alterações morfológicas de áreas costeiras, de praias e dunas. Foi desenvolvido originalmente como um modelo bidimensional do impacto das tempestades, mas foi-se mostrando aplicável a inúmeras condições. O XBeach é usado fundamentalmente para calcular condições de ondas *nearshore*, *set-up* das ondas, *run-up* e galgamento. Para tal necessita de parâmetros de ondas e informações providenciadas por modelos hidrodinâmicos como o Delft3D-SWAN. A Figura 2.21 demonstra uma aplicação das capacidades de modelação do XBeach em águas rasas, demonstrando também a interface entre água e costa na Praia de Cova Gala – Praia da Leirosa. Esta figura corresponde a um *frame* de uma animação que demonstra os estados de agitação marítima causados pela tempestade Hercules em janeiro de 2014 (O vídeo pode ser acedido em: <https://i.imgur.com/skUT4MO.mp4>).

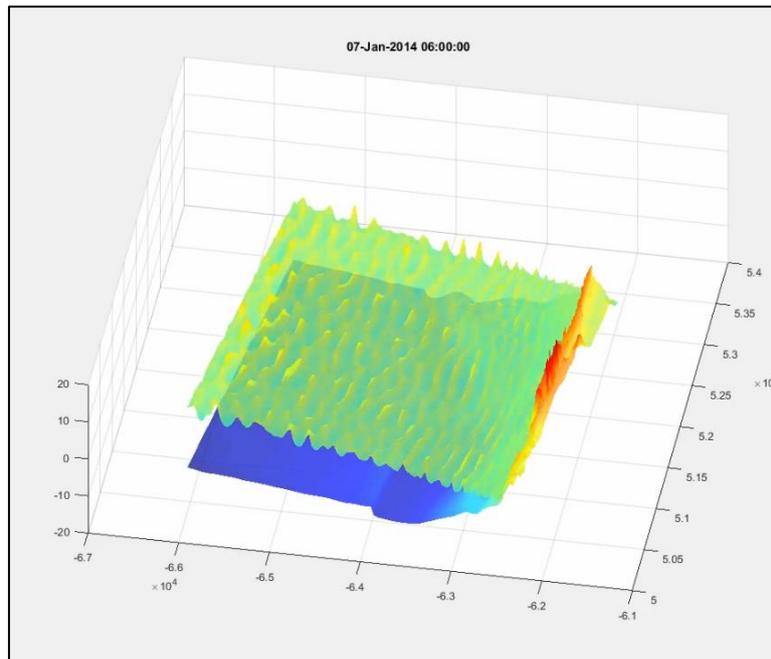


Figura 2.21 - Exemplo de aplicação do Xbeach para 2 de janeiro de 2014, 05:00, na Praia de Cova Gala localizada na Praia da Leirosa

Nos trabalhos de Bolle et al. (2011) a metodologia do XBeach foi testada para três ambientes costeiros distintos com o intuito de avaliar as capacidades deste método em diferentes situações. Os três locais escolhidos pelos autores são: a praia de *Oostende* na Bélgica em que foi aplicado o XBeach (em modelos 1D e 2D), na sua situação mais recorrente, correspondente à avaliação da erosão da praia após condições de tempestade; na costa de *Ada* no Gana de modo a avaliar uma nova infraestrutura de proteção de ondas de longo período; e finalmente em *Elmina*, também no Gana, onde foram estudados os processos de sedimentação em redor do porto da região, bastante utilizado para atividade comercial e turística. Na altura de realização do trabalho, os autores não dispunham de dados para completar a pesquisa no segundo local, de modo que não foi aplicado o XBeach para este caso de estudo.

No primeiro local, os autores produziram dois modelos da praia, um modelo 1D perpendicular à costa que se esperou ter menos precisão devido à curvatura da praia, e um modelo 2D. Devido, mais um a vez, ao facto do XBeach ser um método baseado em processos, foi necessária a calibração do modelo com dados históricos da praia de *Oostende*, em concreto o nível do mar e os valores de altura e período das ondas antes e depois da tempestade que afetou a praia de 8 a 10 de novembro de 2007. Foram também medidos dados topográficos e batimétricos, antes e após a tempestade.

Utilizando as mesmas medições foi realizado um modelo 2D XBeach da praia de *Ostend* (Figura 2.22). O modelo 2D XBeach previu corretamente as maiores quantidades de erosão nas curvaturas do perfil da praia (assinaladas pelas setas verdes na Figura 2.23) onde também está representado o padrão de erosão/sedimentação desta região.

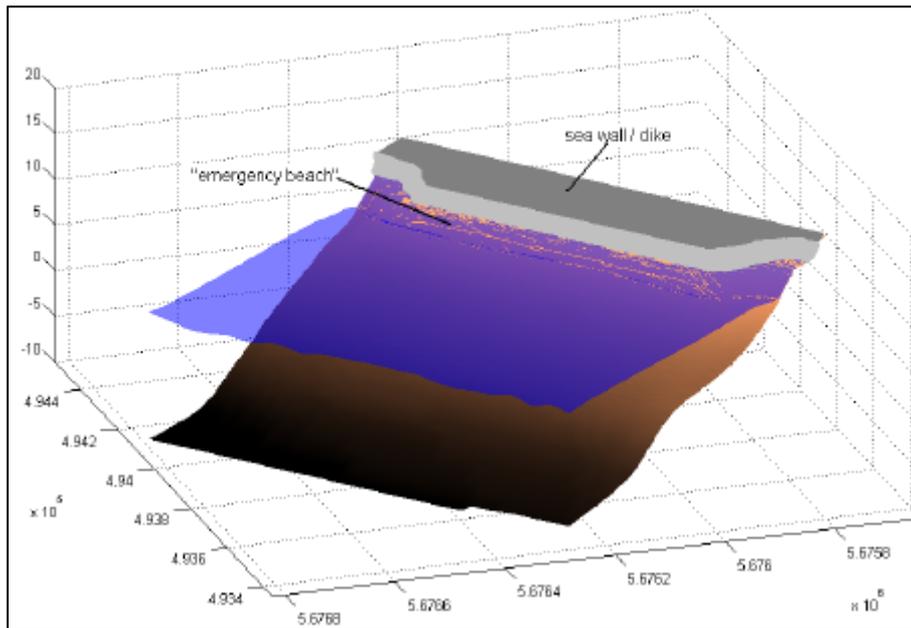


Figura 2.22 - Modelo XBeach 2D para a praia de Ostend [Fonte: Bolle et al. (2011)]

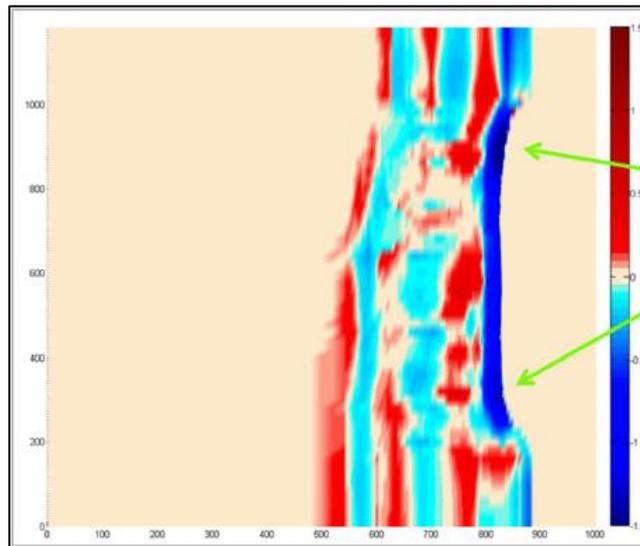


Figura 2.23 - Padrões 2D de erosão (azul) e sedimentação (vermelho) na praia de Ostend, causados pela tempestade em novembro de 2007 [Fonte: Bolle et al. (2011)]

Em *Elmina*, de modo a identificar as causas das quantidades consideráveis de sedimentação observadas perto do porto, que criaram situações de perigo para as embarcações que navegavam em marés baixas, foi elaborado um modelo XBeach 2D. O modelo foi corrido durante um ciclo total de maré, de modo a estudar a evolução dos padrões e concentrações de sedimentos em diferentes estados da maré. O modelo produziu o padrão erosão/sedimentação presente na Figura 2.24, que demonstra que a sedimentação se concentra apenas à frente da entrada do porto. Existe alguma sedimentação perto das zonas de rebentação (*breakwaters*), mas dentro do porto não ocorre qualquer sedimentação, o que levou os autores a concluir que a maré não era a principal fonte de sedimentos dentro do porto. O XBeach revelou-se essencial para compreender os mecanismos complexos dos sistemas hidrodinâmicos na região.

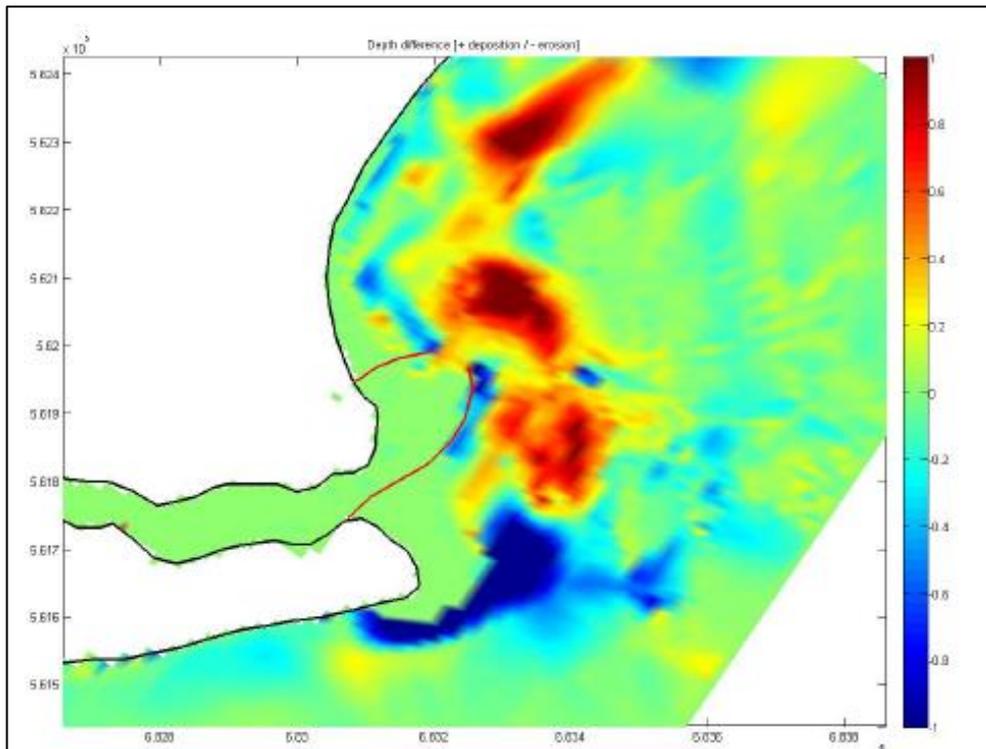


Figura 2.24 - Padrões de erosão (azul) e sedimentação (vermelho) em Elmina (m) [Fonte: Bolle et al. (2011)]

2.2.1.3 Q2DMorfo

O Q2DMorfo é um modelo que se baseia num método linear que consiste em calcular a média da direção vertical e da direção perpendicular à costa, fazendo com que a região morfodinâmica ativa se transforme numa só linha, que representa a linha da costa (Falqués et al., 2019). As alterações costeiras são dadas pela divergência ou convergência da taxa Q^2 do transporte sedimentar total ao longo da costa. Contudo esta modelação a “uma linha” contém inúmeras limitações: primeiro prevê que a linha de costa seja estável, o que não é verificado pelos trabalhos de Ashton et al. (2001), Falqués e Calvete (2005) e Ashton e Murray (2006) que demonstram a instabilidade da linha de costa se o ângulo de incidência da onda for significativo. Por outro lado, a equação mais comum para alterações de pequena escala de uma linha de costa retilínea, é uma função de difusão, o que impede a modelação da propagação das ondas de areia na costa. Estas duas limitações, observadas por Inman (1987), Thevenot e Kraus (1995), Ruessink e Jeuken (2002), Falqués e Calvete (2003), Falqués (2006), provêm do facto da modelação tradicional de “uma linha” negligenciar o efeito das alterações batimétricas perto da costa, associadas às alterações na linha de costa na transformação da onda (Falqués e Calvete, 2005). Mesmo no trabalho de Falqués e Calvete (2005) em que é idealizado um modelo de estabilidade linear da linha de costa, baseado no conceito de “uma linha”, mas considerando as alterações batimétricas associadas às alterações costeiras e descrevendo a instabilidade da linha de costa, existem diversas limitações relacionadas com a negligência das dinâmicas do perfil transversal à costa que são essenciais para essa instabilidade.

Considerando todas estas limitações e características dos modelos de linha de costa de “uma linha”, o Q2DMorfo pretende estender estes modelos adicionando as seguintes características:

² A taxa é calculada pela fórmula CERC (Komar (1998) ; Horikawa (1988)) e representa a taxa do transporte sedimentar total devido à ação das ondas incidentes.

- Incluir o transporte sedimentar perpendicular à costa de forma paramétrica;
- Preservar as capacidades do modelo de estabilidade linear da linha de costa criado em Falqués e Calvete (2005);
- Efetuar uma evolução temporal não linear sem restrição de amplitude de onda e com geometria arbitrária

Assim, o transporte sedimentar é considerado em duas dimensões nas imediações da linha de costa e não apenas na linha de costa como os modelos de “uma linha”. Além disso, é um modelo bidimensional horizontal (2DH) pois é considerada a propagação da onda na topografia 2DH que se desenvolve ao longo do tempo. Por outras palavras, é um modelo equivalente aos modelos de linha de costa *N-line* desenvolvidos por Steetzel et al. (1998) e Dabees e Kamphuis (2000) com a diferença de que as curvas de nível não são movidas quando existem alterações na linha de costa, sendo alternativamente atualizados os *bed levels* numa GRID retangular, como é comum nos modelos 2DH. O Q2DMorfo pode ser então considerado um modelo quasi-2DH. Este método não considera a hidrodinâmica perto da costa pois o transporte sedimentar é calculado diretamente através de parametrização da fórmula CERC para o cálculo da deriva litoral.

As principais limitações dos métodos baseados em processos, passam pela necessidade de obter dados fidedignos de larga escala de modo a calibrar os modelos. Estes dados nem sempre estão disponíveis e muitas vezes são confidenciais, o que leva a determinadas restrições e possíveis incertezas nos dados. Mesmo que se evite o uso destes dados acrescenta-se o possível custo de idas ao campo para efetuar medições para colmatar a falta de dados. Além disso, o poder computacional necessário para incluir os diferentes parâmetros que contribuem para o recuo da costa é bastante elevado, o que limita o uso destes métodos em situações de emergência ou em ambientes costeiros com rápida dinâmica. Embora os métodos baseados em processos sejam mais precisos, visto que são ajustados a dados reais, as dificuldades impostas pelas restrições acima referidas tornam-se uma clara limitação destes métodos. Os métodos semi-empíricos são muitas vezes utilizados como alternativa aos métodos baseados em processos, sendo possível escalá-los a uma escala regional ou mesmo nacional sem grande custo computacional

2.2.2 Métodos semi-empíricos

2.2.2.1 Fórmula de Bruun

A fórmula de *Bruun* representa um modelo simples de determinação do recuo da linha de costa em função da subida do NMM. Esta fórmula relaciona o recuo da costa (R) com o produto entre a subida do nível médio do mar (S) o declive topográfico da costa dado pela razão entre as dimensões verticais ($h^* + B$) e horizontais (W^*) do perfil da praia, a contar da profundidade de fecho (profundidade a partir da qual o perfil de praia não sofre modificações significativas) (Bruun, 1954).

$$R = S \frac{W^*}{h^* + B} \quad (2.1)$$

O modelo assume que o perfil topográfico é transportado na direção da costa sem alterações na sua forma, sendo os sedimentos erodidos da face superior do perfil transportados e depositados na direção do mar de modo a elevar a face submersa e ativa da praia em direção ao mar, na proporção direta da subida do NMM. A regra implícita da fórmula de *Bruun* assume então que toda os sedimentos erodidos pelo recuo do perfil, é transportada na direção do mar. Ao longo das últimas cinco décadas, a fórmula de *Bruun* tem providenciado à comunidade científica métodos de interpretação das alterações costeiras, ajudando no planeamento e execução de projetos de alimentação artificial de praias (Rosati et al., 2013). Embora tenham sido feitas várias tentativas de verificar a regra de *Bruun* através de

medições no campo como em Schwartz (1967), Schwartz (1987), Rosen (1978), Pilkey e Davis (1987) e Bruun (1988), estas revelaram-se inconclusivas e aumentaram algumas dúvidas acerca da capacidade de representação da evolução do recuo de praias devido à subida do NMM, por parte da regra de *Bruun*.

Uma das principais críticas à Regra de *Bruun* passa pela desconsideração do depósito de areia na direção da costa (*landward*). Além disso, a regra de *Bruun* apenas funciona em situações muito distintas, não se conseguindo adaptar a diferentes situações costeiras, por exemplo com características de déficit sedimentar. Embora tenham sido feitas diversas tentativas de incorporar o transporte em direção à costa na Regra de *Bruun* como, por exemplo, em Dean e Maurmeyer (1983), Everts (1985) e Davidson-Arnott (2005), a mais relevante para este trabalho é a proposta de uma regra de *Bruun* modificada criada por Rosati et al. (2013). Nesta formulação são considerados adicionalmente os transportes volumétricos de areia para lá do perfil ativo, quer por meios eólicos quer por processos de *overwash* que ocorrem após grandes tempestades.

2.2.2.2 Fórmula de Bruun modificada

Na fórmula de *Bruun* modificada (Eq. 2.2), proposta por Rosati et al. (2013) B_0 corresponde à altura da berma inicial, h^* à profundidade de fecho, Y_1 , ou $\frac{V_D}{S}$, o comprimento do depósito devido ao galgamento (*washover*) e W^* à largura da zona ativa. Tal como na Eq. 2.1, R corresponde ao recuo da costa correspondente ao valor de S à subida do nível do mar. Um esquema demonstrativo das variáveis da fórmula de *Bruun* modificada pode ser observado na Figura 2.25.

$$R = (W_* + \frac{V_D}{S}) \ln\left(\frac{h_* + B_0}{h_* + B_0 - S}\right) \quad (2.2)$$

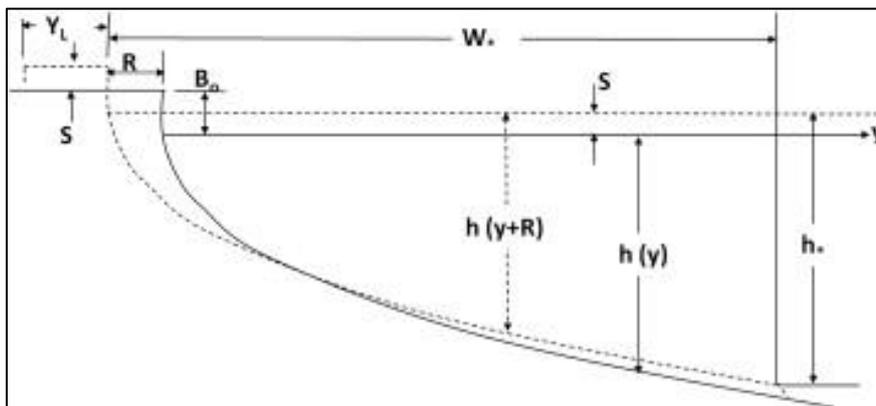


Figura 2.25 - Variáveis da fórmula de *Bruun* modificada [Fonte: Rosati et al. (2013)]

Assim, em situações em que ocorre tanto o transporte na direção do mar, como na direção da costa, o recuo obtido com a fórmula de *Bruun* modificada é mais realista. Além disso, visto que se trata de um método paramétrico semi-empírico, não tem a necessidade de grande poder computacional e a sua formulação matemática é de simples aplicação. No entanto, não deixam de existir limitações inerentes a este método. Para começar, por se tratar de um modelo 1D, não contém uma componente automática de aplicação a uma área ou a um conjunto largo de pontos, terá de ser efetuada individualmente a cada ponto e aplicado a cada perfil individual de praia. Além disso, e talvez a principal lacuna deste método, não inclui a influência dos processos morfodinâmicos no processo do recuo da linha de costa, em particular do déficit sedimentar, para além de não considerar a hidrodinâmica local. Apenas é contabilizado o contributo da subida do NMM, visto que este método se trata duma melhoria da fórmula original de *Bruun*. Ao não ser considerada a influência do déficit sedimentar no recuo da

costa, este método apenas se revela adequado a situações costeiras em que apenas a subida do NMM comanda o processo erosivo.

A metodologia apresentada nesta dissertação procura adaptar a fórmula de *Bruun* modificada, automatizando-a, permitindo a sua aplicação num maior número de ambientes costeiros arenosos.

3 Metodologia/Processamento

Neste capítulo será descrita a metodologia seguida na determinação do recuo da linha de costa baseada nos princípios da formulação modificada de *Bruun*. Esta metodologia desenvolvida por Antunes (2017) e implementada originalmente em *Fortran*, foi no presente trabalho de dissertação adaptada para um programa elaborado em linguagem *Python* e testada numa faixa costeira da Costa Nova (Aveiro), introduzindo um maior automatismo ao método proposto pelo autor.

De seguida far-se-á uma breve descrição da zona de estudo, onde foi testada a metodologia, apresentando o seu enquadramento geográfico, o seu clima, a sua ocupação do solo e o seu relevo, por forma a realçar a importância deste estudo nesta zona costeira, identificada como de elevada vulnerabilidade face às projeções de subida do NMM por Rocha (2016). De seguida, será descrita detalhadamente a metodologia delineada, indicando os dados e o processamento efetuado, de forma sequencial e que está esquematizada e sob a forma de *workflow* na Figura 3.1.

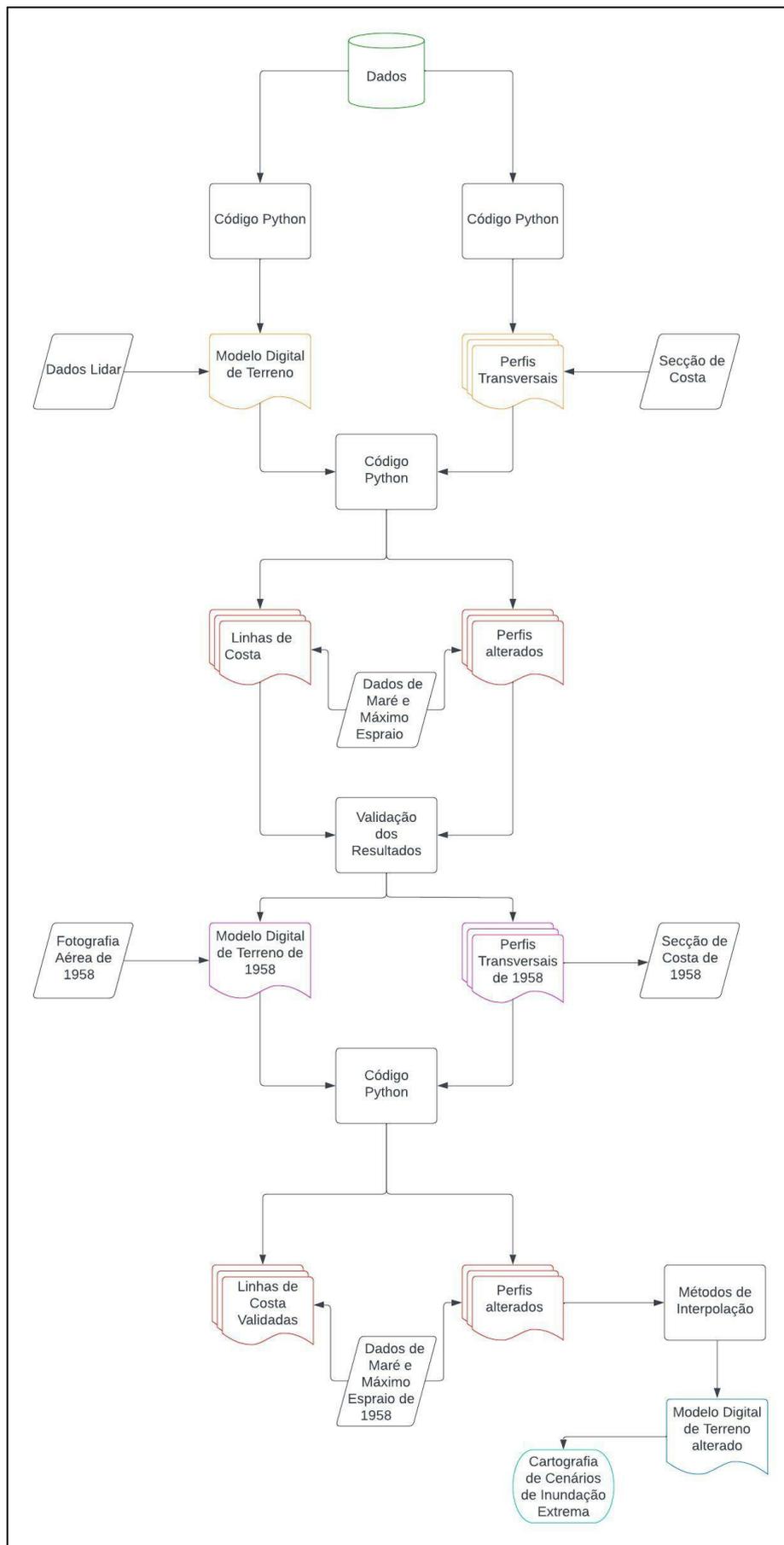


Figura 3.1 - Workflow da metodologia apresentada nesta dissertação

3.1 Área de estudo

3.1.1 Enquadramento Geográfico

A área de estudo onde será testada esta metodologia é a faixa costeira da Costa Nova no concelho de Ílhavo, distrito de Aveiro (Figura 3.2).

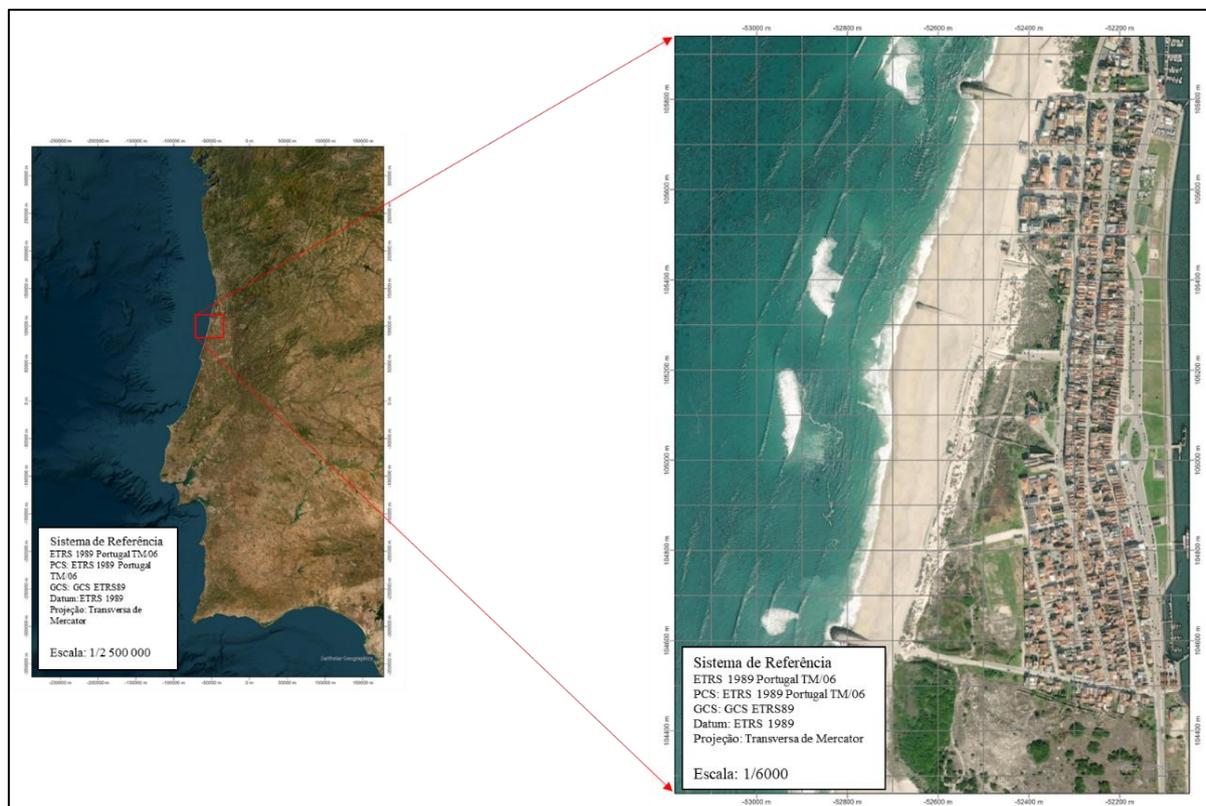


Figura 3.2 - Enquadramento Geográfico da Costa Nova

A Costa Nova localiza-se na região Centro e na sub-região do Baixo Vouga. É limitada a Norte e Este pelo concelho de Aveiro, a Sul pelo concelho de Vagos e a Oeste pelo Oceano Atlântico (Câmara Municipal de Ílhavo, 2020). Possui uma costa com um areal extenso e presença de dunas encontrando-se limitada a Este pela Ria de Aveiro. A Ria de Aveiro é um sistema lagunar costeiro de baixa profundidade e extensas zonas entre marés, no qual desagua o rio Vouga, o principal afluente da ria. Estende-se por 45 km ao longo da costa ocidental de Portugal desde Ovar até Mira (*ibid*).

3.1.2 Clima

A região da Costa Nova, por se situar no Litoral Norte de Portugal Continental, detém um clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e pouco quente, o que corresponde a uma classificação Csb segundo a classificação de *Koppen* (Koppen, 1931), um método de classificação do clima bastante respeitado, que utiliza a vegetação natural como expressão do clima de um local. A precipitação média mensal pode chegar aos 150 mm nos meses de janeiro e fevereiro, mas é quase nula nos meses do verão (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, 2022). A temperatura média ronda os 12 °C no inverno e os 19 °C no verão (Instituto Português do Mar e Atmosfera, 2022).

Na Figura 3.3 encontram-se os dados de precipitação média mensal e temperatura média mensal no distrito de Aveiro durante o ano de 2021. É possível verificar que a temperatura média rondou os 19 °C no verão, tal como tem sido observado por séries longas, no entanto nos meses imediatamente após o verão (nomeadamente em setembro) a temperatura mensal foi a mais alta do ano. Entre fevereiro e

maio a temperatura rondou os 15°C, tendo se verificado temperaturas nos meses de inverno (novembro a janeiro) em torno dos 12°C (temperatura normal nos meses de inverno). No que toca à precipitação total mensal, foi superior à média em séries longas, chegando aos 200 mm, enquanto no verão foi quase residual, situando-se sempre abaixo dos 50 mm. Vale a pena referir que nos meses de abril e outubro a precipitação total teve valores semelhantes aos de janeiro.

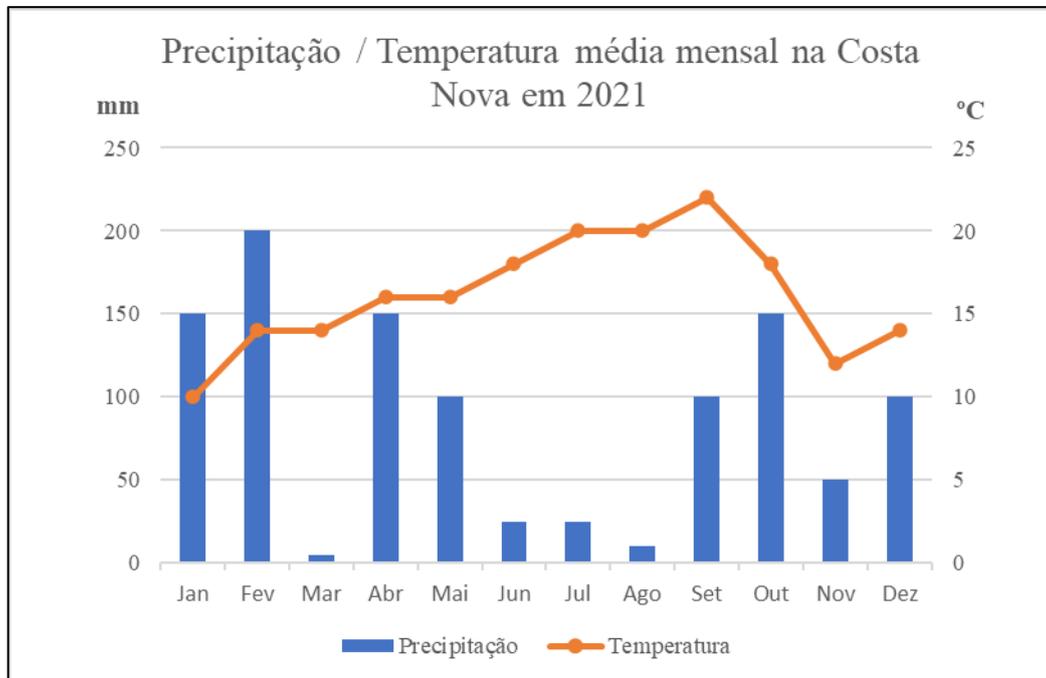


Figura 3.3 - Gráfico da precipitação total mensal em mm e da temperatura média mensal em °C na Costa Nova em 2021
 [Fonte: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/monitorizacao/index.jsp?selTipo=m&selVar=rr&selAna=to&selAno=-1>]

3.1.3 Ocupação do solo

A região da Costa Nova é caracterizada pela grande quantidade de areal e dunas, bem como pelo tecido urbano e o mato natural. Na Figura 3.4, está representado o mapa de uso e ocupação do solo da Carta de Ocupação do Solo (COS) produzida em 2018 pela Direção Geral do Território (DGT) (Direção Geral do Território, 2018). Junto à ria existem parques, instalações desportivas e marinas. O tecido urbano encontra-se entre os espaços de lazer, perto da ria, e a vegetação e areal do lado da costa, e possui uma significativa rede viária de conexão com a estrada marginal.

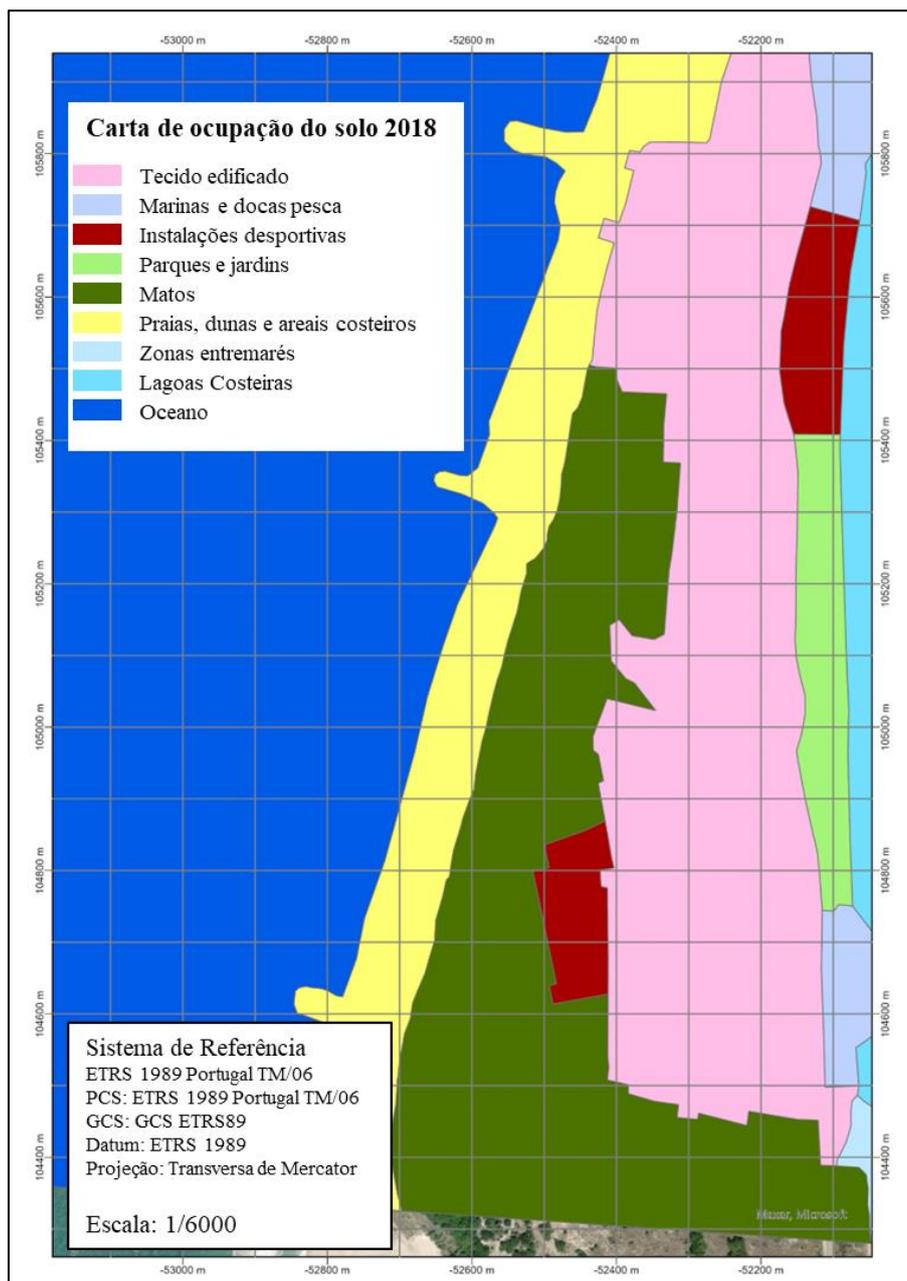


Figura 3.4 - Carta de Ocupação do Solo na Costa Nova em 2018 [Fonte: Direção Geral do Território (2018)]

Na Tabela 3.1, encontram-se as percentagens de cada classe de ocupação do solo na zona da Costa Nova.

Tabela 3.1 - Percentagem de ocupação de cada classe no solo da Costa Nova

Classe	Área (km ²)	Percentagem
Tecido edificado contínuo predominantemente horizontal	0.36	~37.6%
Marinas e docas pesca	0.032	~3.3%
Instalações desportivas	0.045	~4.7%
Parques e jardins	0.040	~4.2%
Matos	0.29	~30.3%
Praias, dunas e areais costeiros	0.19	~19.9%
	Total: 0.957	

As zonas de praias, dunas e areais costeiros, o tecido edificado e os matos demonstram ser, de longe, as classes mais prevalentes em termos de área na Costa Nova, ocupando todas elas cerca de 88% da localidade. A classe do tecido edificados ocupa uma área considerável (37.6%) principalmente devido à alta atividade económica e social na Costa Nova, em particular, o turismo. Os matos bravos correspondem a cerca de 30.3% da área da Costa Nova ou 0.29 km², enquanto as zonas de praias, dunas e areais costeiros albergam 0.19 km² ou 19.9% da região. As restantes classes ocupam entre 0.32 km² e 0.45 km² de área cada uma.

3.1.4 Relevo

A região da Costa Nova por se situar no litoral da Laguna de Aveiro (Figura 3.5A), caracteriza-se por uma grande complexidade ambiental devido à sua formação geológica recente (Quaternário), à localização na interface entre oceano e continente, às atividades antrópicas como ampliação de superfícies editadas e ao uso intensivo para o turismo e atividades portuárias (Souza et al., 2014).

A Laguna de Aveiro encontra-se isolada do Oceano Atlântico por um cordão arenoso que teve sua formação iniciada no Séc. X, a partir de deposição de sedimentos na costa a Sul de Espinho (Dias et al., 2012). No final do Séc. XI e início do Séc. XII, o cordão arenoso já se localizava em Ílhavo, estendendo-se posteriormente até Norte da Torreira (Dias et al., 1994). No Séc. XV, o cordão fixou-se nas proximidades de São Jacinto e no Séc. XVII, a barra natural da Laguna posicionou-se na atual Vagueira (Figura 3.5). No Séc. XVIII, quando o cordão atingiu os arredores de Mira ocorreu o fechamento natural da barra, tornando a Laguna insalubre (Dias, 2009).

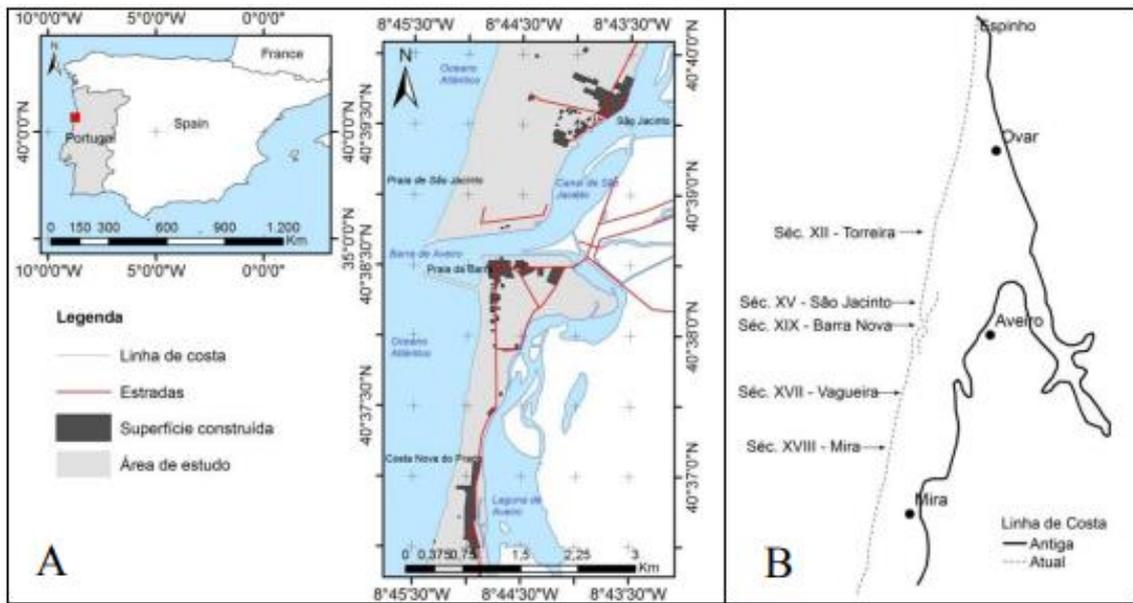


Figura 3.5 - A) Localização geográfica do trecho entre São Jacinto e Costa Nova; B) Processo evolutivo do cordão arenoso ao longo dos séculos [Fonte: Souza et al. (2014)]

Em Souza et al. (2014) foram avaliadas as modificações do relevo no cordão arenoso responsável por isolar a Laguna de Aveiro do Oceano Atlântico, a partir de propostas de cartografia geomorfológica de Tricart (1965), Peña Monné et al. (1997) e Joly (1997), na escala 1:25 000, para os cenários de 1958 e de 2007.

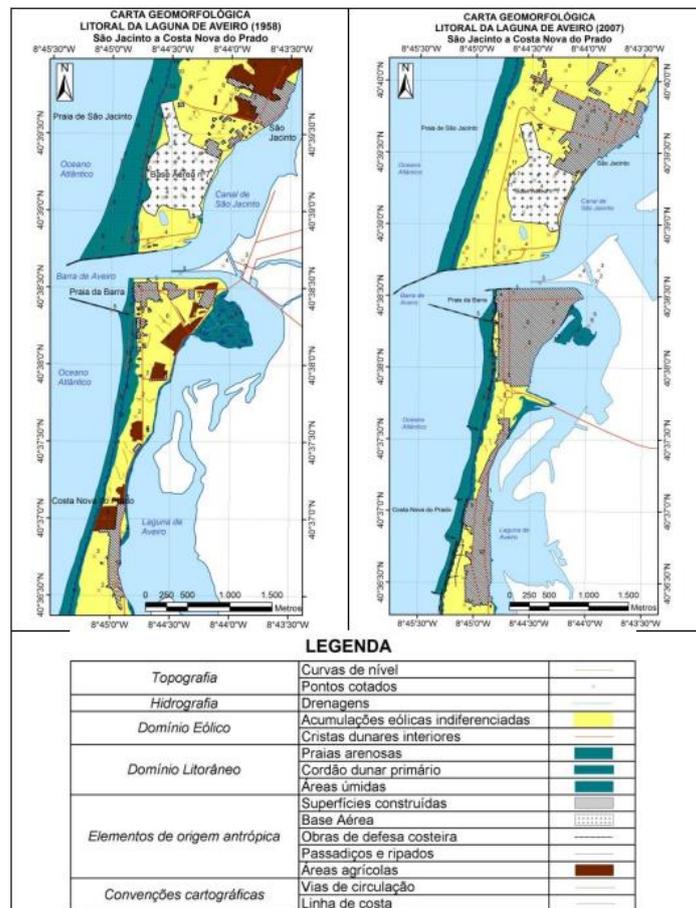


Figura 3.6 - Carta Geomorfológica - Litoral da Laguna de Aveiro - São Jacinto a Costa Nova em 1958 (A) e 2007 (B) [Fonte: Souza et al. (2014)]

Na Costa Nova as principais alterações no relevo entre 1958 e 2007 devem-se ao grande crescimento urbano que engoliu algumas acumulações eólicas indiferenciadas e áreas agrícolas, estendendo-se até à praia arenosa. Visando a proteção do cordão dunar frontal, que atua como barreira natural contra a ação de galgamentos oceânicos, foram implantados passadiços e ripados (Souza et al., 2014).

Observando um mapa hipsométrico da região da Laguna de Aveiro (Figura 3.7), é possível verificar que a Costa Nova está integrada numa longa faixa aplanada com cotas inferiores a 200 metros. Esta faixa planada é habitualmente referida na literatura de geomorfologia como “plataforma litoral”. Segundo Daveau (1998) uma plataforma litoral é “uma faixa aplanada, desigualmente levantada (entre o nível do mar e 200 a 250 m de altitude), larga, em geral, de algumas dezenas de quilómetros.” A morfologia da plataforma litoral é caracterizada pela sedimentação e erosão costeira e pela abundância de depósitos sedimentares. Embora a plataforma litoral possa apresentar características bastante diversas, desde patamares altimétricos a rampas até ao mar - tal como é demonstrado nos trabalhos de Ferreira (1978), Araújo (1991), Granja e Carvalho (1992) ou Gomes (2008) – no caso específico da área da Laguna de Aveiro a plataforma litoral contém uma grande largura, das maiores a nível nacional, e uma altitude máxima de cerca de 200 metros com um ligeiro declive até ao mar.

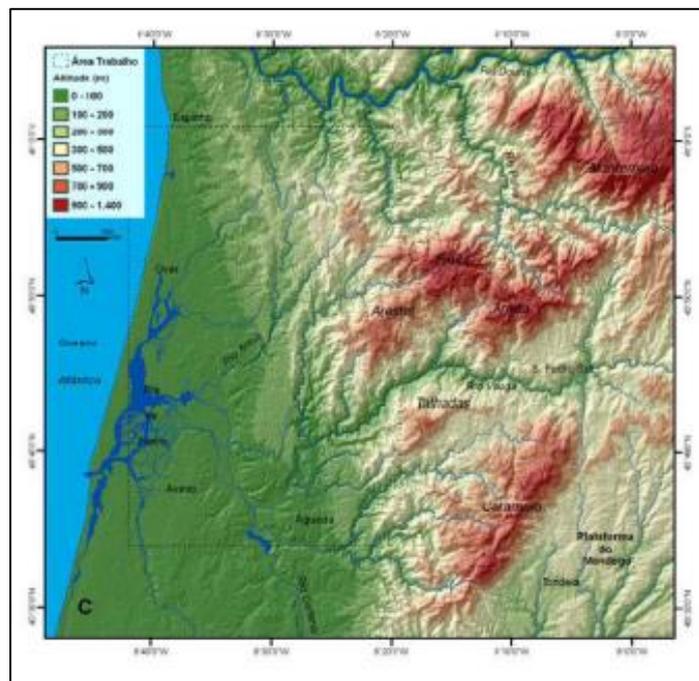


Figura 3.7 - Mapa Hipsométrico da região da Laguna de Aveiro [Fonte: Martins (2012)]

Na Costa Nova, situada no setor mais a Oeste desta plataforma litoral, as altitudes atingem apenas os 50 metros e predominam as areias e dunas litorais até aos canais da laguna. Toda a costa nesta região é composta por praias extensas longitudinalmente e formadas por areias médias a grosseiras na sua parte emersa e areias médias a finas na parte submersa (Sistema Nacional de Informação de Ambiente, 2022). Existe, contudo, uma reduzida alimentação de areias nesta região, principalmente devido à abertura artificial da barra efetuada em 1808 que cortou o cordão litoral entre São Jacinto e a atual praia da Barra, criando um setor Norte e um setor Sul, onde se localiza a Costa Nova (Martins, 2012).

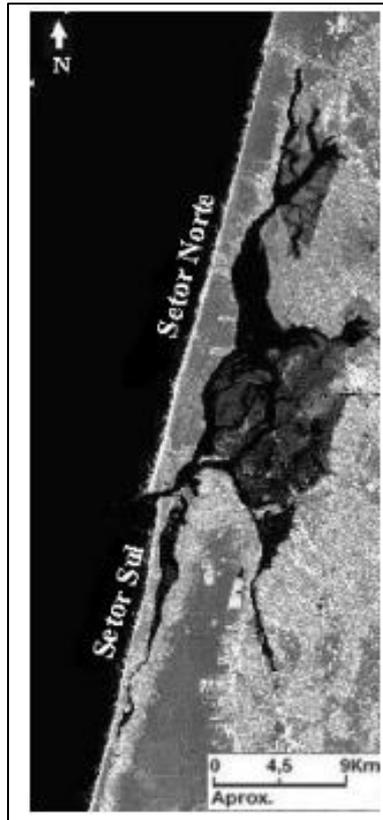


Figura 3.8 - Laguna de Aveiro e setores da costa (Setor Norte e Setor Sul) - Imagem da banda 4 com expansão linear do contraste tonal. Ampliação do extrato da cena 204/32, (Landsat 7 ETM+) [Fonte: Martins (2012)]

Assim, verifica-se um recuo da costa no setor sul em relação ao setor norte com um balanço sedimentar negativo e um areal muito menos extenso. Nos areais da Costa Nova até à Vagueira verificam-se inúmeras estruturas de defesa de costa fragmentando a linha contínua da costa em pequenas praias (Martins, 2012).

Nos trabalhos de Ponte Lira et al. (2016) foi apresentado o primeiro estudo da evolução da costa à escala nacional, englobando toda a costa de Portugal Continental. São apresentadas as linhas de costa obtidas para 1958 e 2010, para os diferentes troços da costa portuguesa, bem como dados acerca das taxas de recuo em cada um dos perfis considerados. Na Costa Nova, este estudo indicou que se verificou uma taxa de recuo na ordem dos 2.5 m/ano, correspondendo a um recuo médio de 129.4 m entre 1958 e 2010. A abordagem tomada por Ponte Lira et al. (2016), é diferente da apresentada nesta dissertação, sendo as linhas de costa vectorizações da berma da praia sobre fotografia aérea das duas épocas consideradas.

3.2 Dados

De modo a obter os resultados pretendidos neste projeto, são necessários vários tipos de dados de diversas fontes. A utilização de dados LiDAR fornecidos pela DGT é essencial para a criação de um MDT inicial da faixa costeira a partir do qual serão criados elementos fundamentais para a aplicação da metodologia, como os perfis transversais e posteriormente as linhas de costa e o MDT projetado. Os dados de previsões do NMM nas épocas consideradas são fulcrais para a continuidade da metodologia ao longo das diversas épocas intermédias entre a inicial e a final. A Carta de Ocupação e Uso do Solo de 2018 (Direção Geral do Território, 2018) serviu de base para a obtenção da localização e extensão das águas interiores, bastante comuns na área de estudo que foi considerada e que permitiram a interrupção da extensão dos perfis transversais para estas zonas. De modo a poder validar

os resultados obtidos, foram utilizadas fotografias aéreas da Costa Nova, de um voo da Força Aérea Americana realizado para os Serviços Cartográficos do Exército, datada de 1958, para os quais foram ainda medidos no terreno pontos fotogramétricos para a orientação dos modelos fotogramétricos respetivos. Adicionalmente, foram utilizados o modelo de marés no porto de Aveiro e a projeção de subida do NMM segundo o cenário Mod.FC_2b anteriormente referido.

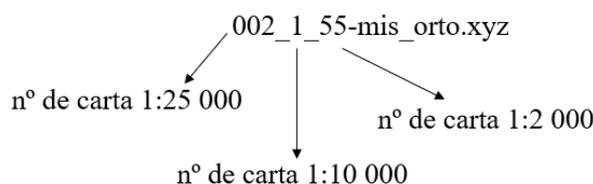
A Tabela 3.2 indica os dados utilizados, a sua fonte, data de aquisição e algumas observações relevantes.

Tabela 3.2 - Dados utilizados com a respetiva fonte, data de aquisição e observações

Dados	Fonte	Data de Aquisição	Observações
Modelo digital de terreno (dados Lidar)	DGT	7 de dezembro de 2011	-Dados Lidar com uma resolução de 2m
Carta de uso e ocupação do solo para Portugal Continental (COS2018)	DGT	Novembro, 2019	-Níveis 1 e 2
Previsões de nível médio do mar para o cenário Mod.FC_2b	(Antunes, 2019)	-	-Dados do NMM na Costa Nova entre 2010 e 2100 com intervalos de 10 anos
Modelo de marés no porto Aveiro	Antunes, 2007 ³	-	-Modelação da maré no Porto de Aveiro
Fotografia área da Costa Nova de 1958	CIGeoE	12 de junho de 1958	- 2 fiadas de 6 fotografias aéreas da Costa Nova datadas de 1958 realizadas pela USAF

3.3 Modelo Digital de Terreno

Os dados LiDAR usados para a produção do MDT correspondem a levantamentos do litoral de Portugal Continental com uma extensão de cerca de 600 m de faixa costeira marítima e 400 m de faixa costeira terrestre. O levantamento LiDAR foi executado em 2011 e o modelo de dados disponibilizado contém uma resolução de 2 m. Os dados LiDAR brutos são compostos por 1793 ficheiros de pontos cotados (X,Y,Z) cujo nome tem o seguinte formato:



No entanto, como a metodologia apenas vai ser testada na região da Costa Nova, apenas foram utilizados os ficheiros que contêm pontos localizados na região da Costa Nova. Foram utilizadas apenas 4 folhas (indicadas na Figura 3.9), cada uma englobando uma área de 4 km².

³ Previsão de Marés dos Portos Principais de Portugal. Disponível em: http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html

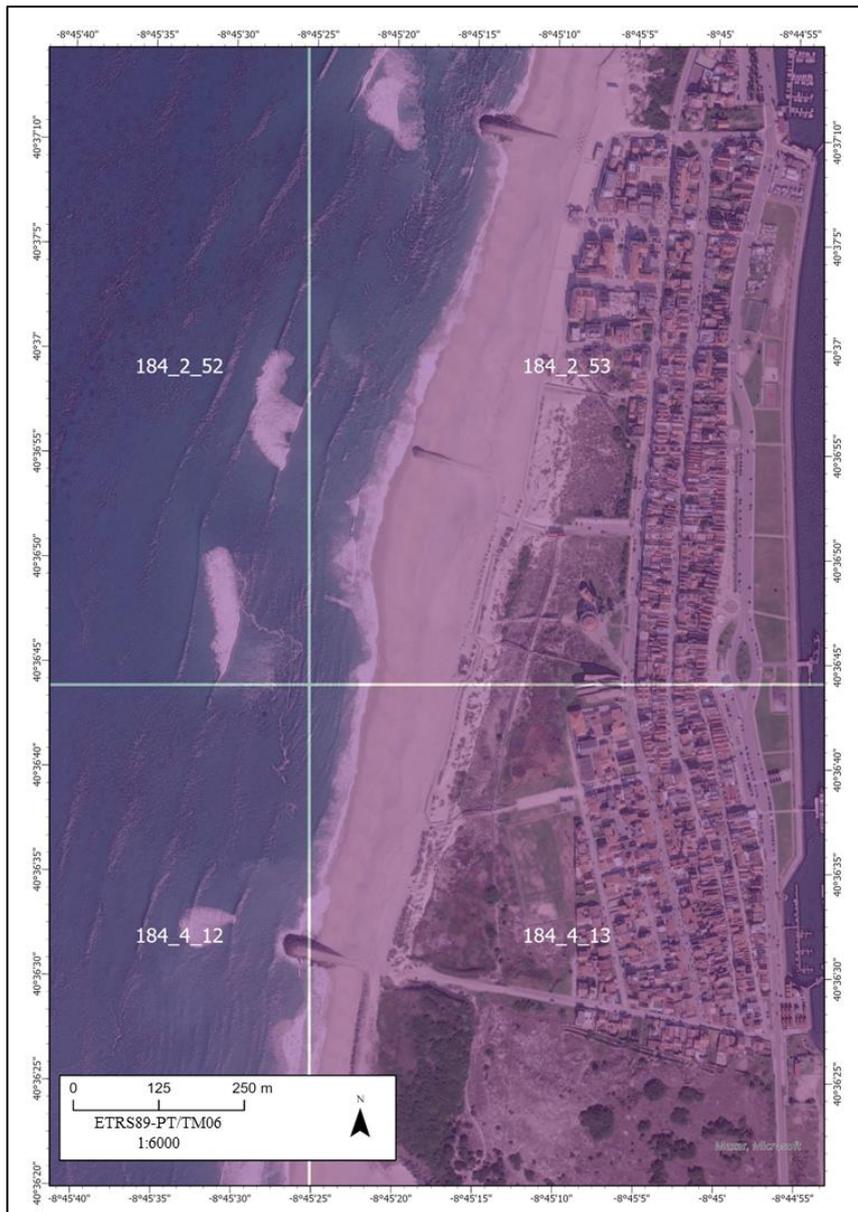


Figura 3.9 - Representação das cartas 1:2000 que englobam a área de estudo

O MDT foi produzido de forma automatizada, usando para o efeito um código *python* que lê cada um dos pontos cotados do LiDAR em cada um dos ficheiros que se pretende utilizar, transforma-os numa *layer* vetorial, sendo posteriormente convertido num ficheiro *raster .tif*. A transformação da *layer* vetorial para uma estrutura *raster* é possível com recurso a uma biblioteca que permite a execução de comandos *Arcgis*⁴ num *script python*. O MDT obtido está representado na Figura 3.10.

⁴ ESRI (2021). ArcGIS Pro: Release 2.9. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

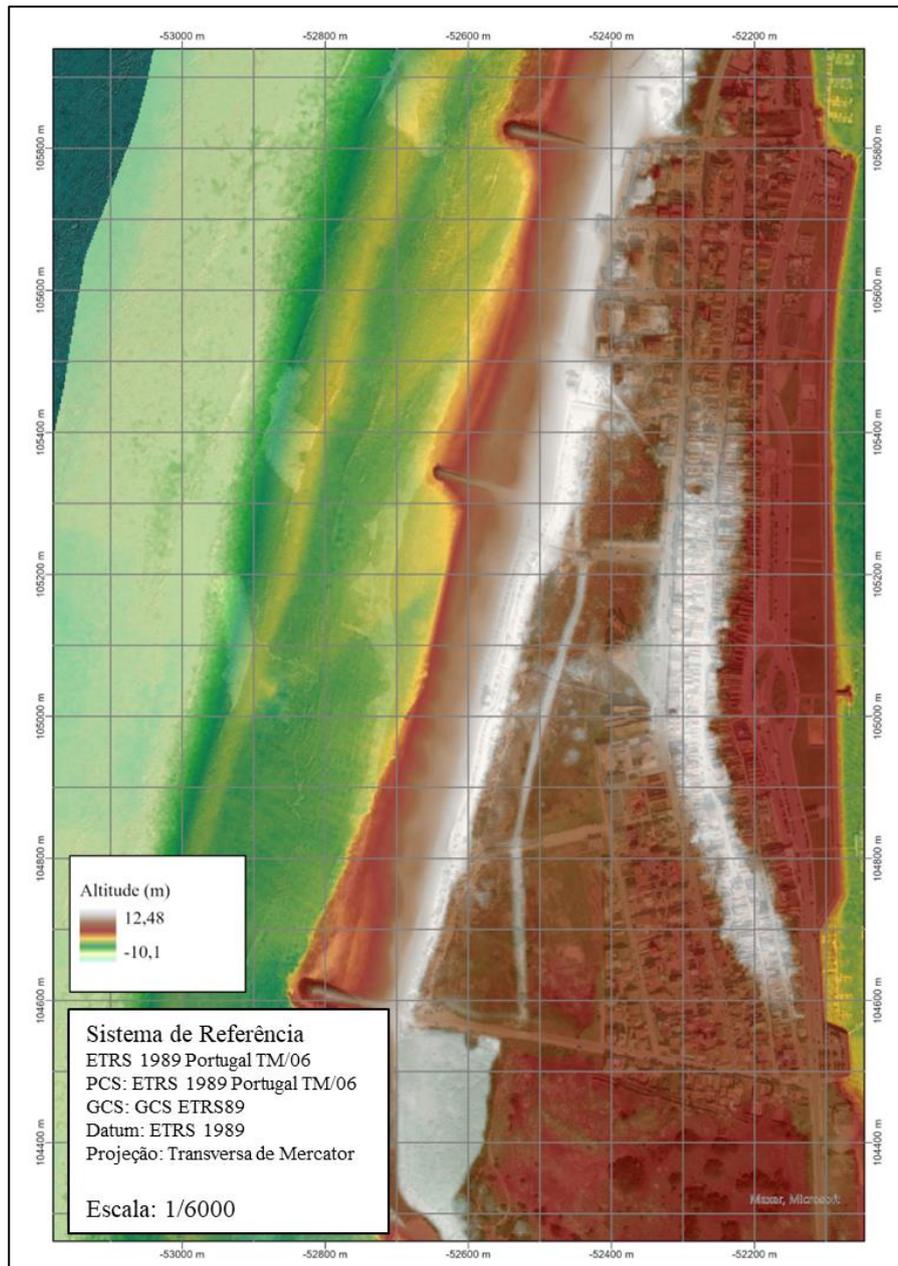


Figura 3.10 - Modelo Digital de Terreno da Costa Nova

3.4 Cenário de subida do Nível Médio do Mar e cálculo do Máximo Espraio

3.4.1 Cenário de Subida do NMM

Visto que esta metodologia é baseada numa adaptação da formulação modificada de *Bruun*, terão de ser conhecidos com rigor as projeções do NMM nos períodos temporais para os quais se pretende quantificar a erosão costeira. Os valores de subida do NMM entre as décadas de 2010 (data do MDT inicial) a 2100, utilizados nesta metodologia, foram retirados da projeção Mod.FC_2b de Antunes (2019) baseada numa taxa de subida do nível médio do mar de 4.1mm/ano para Cascais entre 2006 e 2016, e obtida com uma serie de medições médias diárias, baseadas nas observações do marégrafo de Cascais. Na Figura 3.11 é demonstrada a previsão central deste cenário delimitada por uma zona de incerteza obtida com uma probabilidade condicional e limitada superiormente pela probabilidade máxima (97.5%) e inferiormente pela probabilidade mínima (2.5%). A azul é indicada a curva do nível médio do mar observado de 1992 a 2006. De referir que esta projeção se refere à subida relativa do

NMM e referenciada ao *datum* vertical nacional (Cascais 1938), ao passo que as projeções globais, como as do IPCC, são subidas absolutas do NMM.

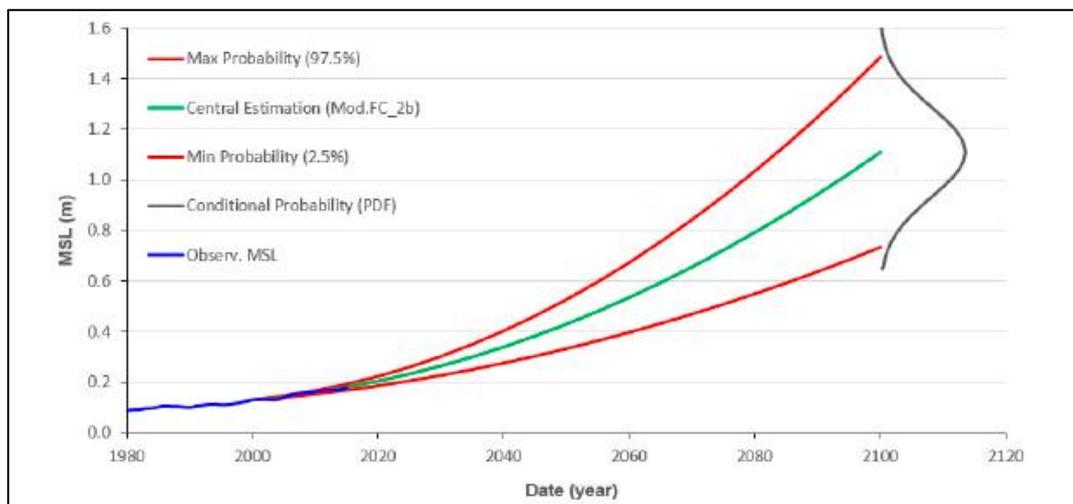


Figura 3.11 - Modelo de projeção da subida do NMM Mod.FC_2b (em metros) com os limites de probabilidade de 95% de confiança, sobrepostos por uma função de densidade probabilidade e o NMM em Cascais relativo ao *datum* vertical de Cascais 1938 [Fonte: Antunes (2019)]

3.4.2 Máximo Espraio

O Máximo Espraio (ME), na perspetiva desta metodologia, é o elemento essencial na definição da localização da linha de costa, num horizonte temporal predefinido, devido à subida do NMM. Existem outros métodos para definir a linha de costa, como a berma da praia, mas não seria aplicável aqui pois nem sempre é possível definir corretamente a berma devido à sua dinâmica de sazonalidade. O ME é composto por três grandes componentes diretamente relacionadas com a interação do oceano com a costa:

- O primeiro elemento é o valor da subida do NMM até ao final da década considerada, sendo obtido através de cenários de previsão do NMM sob a influência do aquecimento global no planeta, como é o caso do Mod.FC_2.
- O segundo elemento é uma maré extrema composta por duas componentes: o valor máximo de preia-mar máxima da maré astronómica ($PM_{m\acute{a}x}$) verificado num período de 10 anos, obtida através do modelo harmónico de maré do porto de Aveiro e o valor da sobrelevação meteorológica de período de retorno de 10 anos, determinado por Antunes et al. (2019) e atualizado face aos valores de Vieira et al. (2012).
- O terceiro e último elemento corresponde ao *run-up* total mencionado anteriormente. Nesta metodologia o *run-up* possui um período de retorno de 30 anos e é composto pelo *set-up* (com componente estática e dinâmica e que depende do declive da costa) adicionado ao *run-up* incidente.

Assim, a formulação do máximo espraio corresponde à expressa na Eq. 3.1 onde o t indica o ano considerado no cálculo do ME e os números 10 e 30 aos períodos de retorno para a maré máxima e sobrelevação meteorológica e, o *run-up* total, respetivamente. Os valores de sobrelevação meteorológica e de H_s das ondas consideradas no *run-up* total foram ligeiramente sobrestimados para os períodos climáticos mais longos (2040-2070 e 2070-2100), por se assumir um agravamento da intensidade dos eventos extremos, como consequência das alterações climáticas. O ME obtido com esta formulação é válido para a década que termina no ano t .

$$ME(t) = sNMM(t) + [PM_{\text{máx}}(10) + SM(10)] + RunUpTotal(30) \quad (3.1)$$

Os valores do máximo espraio, e de todas as suas componentes, para a Costa Nova entre 2010 e 2100, estão presentes na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Valores de Preia-mar máxima, sobrelevação meteorológica, subida do NMM, *run-up* total e máximo espraio

Ano	PM _{máx} (m)	SM (m)	sNMM (m)	Run-Up Total (m)	ME (m)
2010	1.95	0.40	0.17	2.5	5.0
2020	1.95	0.40	0.22	2.5	5.1
2030	1.95	0.40	0.27	2.5	5.1
2040	1.95	0.45	0.33	2.5	5.2
2050	1.95	0.45	0.40	2.6	5.4
2060	1.95	0.45	0.47	2.6	5.5
2070	1.95	0.45	0.56	2.7	5.7
2080	1.95	0.50	0.65	2.7	5.8
2090	1.95	0.50	0.75	2.8	6.0
2100	1.95	0.50	0.85	2.8	6.1

3.5 Criação de perfis transversais

Os perfis transversais à linha de costa são um elemento essencial, pois a partir dos pontos que os constituem é calculado o recuo da linha de costa. Os perfis correspondem a secções do MDT com 1200 m de comprimento e perpendiculares à costa que contém pontos cotados segundo uma determinada resolução espacial. Para construir os perfis foi elaborado um código *python* com a capacidade de executar comandos do *Arcgis* e de criar automaticamente retas perpendiculares a uma linha de orientação da costa. No caso particular deste estudo, e uma vez que a área selecionada apresenta uma extensão geográfica reduzida, a criação da linha de orientação da costa perpendicular aos perfis foi efetuada através da vectorização manual (Figura 3.12). O espaçamento entre cada perfil é previamente fornecido ao programa, bem como o MDT da região.



Figura 3.12 - Secção de Costa vetorizada

Após a criação dos perfis (Figura 3.13), estes são convertidos em pontos, espaçados de 2 em 2 metros (resolução equivalente à do MDT), para os quais se extraiu o valor da cota correspondente à cota do MDT na sua localização, ficando assim cada ponto do perfil com coordenadas (X,Y,Z) bem definidas. De seguida são exportadas as coordenadas dos pontos cotados para ficheiros de texto onde poderão ser processados.



Figura 3.13 - Perfis transversais à linha de costa criado pela aplicação Python

3.6 Adaptação da Regra de Bruun modificada (método semi-empírico do recuo da costa)

Após a criação dos perfis transversais e definição das previsões de NMM e máximo espraio na janela temporal desejada, é efetuada a transformação em cada ponto de coordenadas (X,Y,Z) do MDT para coordenadas de perfil (D,H) correspondendo, respetivamente, à distância de perfil contada a partir do ponto de altitude 0, negativa para o lado do mar e positiva para terra, e a altitude do ponto. A transformação na componente horizontal (X,Y) (Eq. 3.2), é feita através de uma matriz rotação, com ângulo igual ao rumo do perfil, em torno do ponto de coordenadas (X₀,Y₀), coordenadas de origem da distância do perfil e correspondentes ao ponto de H=0. A altitude H dos pontos do perfil corresponde à coordenada Z do perfil extraído do MDT. Assim, os valores de D serão positivos para cada ponto do lado da terra e com altitude positiva, e negativos para cada ponto do lado do mar e com altitude negativa.

$$D = (X - X_0) \times \cos(\theta) + (Y - Y_0) \times \sin(\theta) \quad (3.2)$$

$$H = Z \quad (3.3)$$

Após esta transformação é possível aplicar a metodologia que adapta e aplica a fórmula de Bruun modificada a cada ponto de forma iterativa, atualizando o valor D e H a cada iteração (10 anos) e calculando o recuo da linha de costa (R) para cada perfil (Eq. 2.2). Para melhor entender os conceitos que definem esta metodologia é necessário analisar a Figura 3.14.

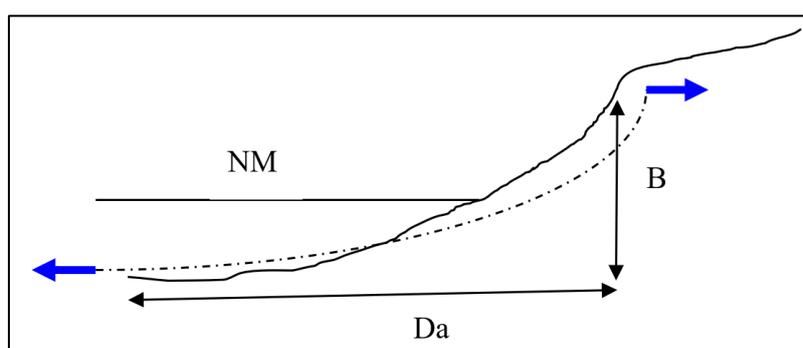


Figura 3.14 - Esquema explicativo das componentes essenciais na criação do ciclo que calcula o recuo da costa segundo a formulação da *Bruun* modificada desenvolvida em Antunes (2017)

A Figura 3.14 contém um esquema que identifica as principais componentes no cálculo do recuo de um perfil transversal. Neste esquema, D_a , correspondente a W^* (c.f. Eq.2), representa a linha base do perfil que se estende desde a profundidade de fecho (profundidade máxima dos pontos na linha base do perfil) até ao limite de cota máxima do perfil que corresponde à cota de máximo espraio, já referida anteriormente. O B representado na figura, é obtido somando a cota de máximo espraio (B) à profundidade de fecho (h^* na Eq.2) enquanto o NM equivale ao NMM.

Nesta metodologia desenvolvida por Antunes (2017), introduz-se uma função de elasticidade, assim designada pelo autor, com o objetivo de introduzir o princípio da formulação modificada de *Bruun*, ou seja, a capacidade de distribuir os sedimentos resultantes da erosão, nos dois sentidos, no sentido do mar e da terra. Nesta função de elasticidade, os valores de D e H são alterados segundo a posição do ponto no perfil. Se o D do ponto for negativo, ponto de altitude negativa, este mantém-se e ao seu valor de H é aplicada a Eq. 3.4. Se, contrariamente, o ponto tiver um valor D positivo, de altitude positiva, são aplicadas as Eq. 3.5 e Eq. 3.6, respetivamente ao seu valor de D e H.

$$H_i = H \times (1 - s^{1.5}) \quad (3.4)$$

$$D_i = D + Fe \times R \times \frac{(D - X_{ref})}{D_a} \quad (3.5)$$

$$H_i = H \times (1 - s^3) \quad (3.6)$$

Na Eq. 3.4 e na Eq. 3.6, H_i corresponde ao novo valor de H após a aplicação da função de elasticidade, enquanto s corresponde à subida do NMM entre a época da iteração atual e da iteração anterior. Na Eq. 3.5, D_i indica o novo valor de D, Fe é um fator de escala da função de elasticidade, R o valor do recuo calculado na Eq. 2 para o perfil na época corrente, X_{ref} é a distância D correspondente à linha de base do perfil. Aos pontos com um D superior à distância de transporte dos sedimentos *landward* é induzida uma média ponderada da cota entre pontos sucessivos do perfil para suavizar a duna.

Todo este processo é repetido para todos os pontos de todos perfis, um número de vezes igual ao número de décadas entre a época inicial e a final. Por exemplo, no contexto do presente trabalho de tese, o código desenvolvido em *python* é aplicado aos perfis numa janela temporal entre 2010 e 2100, o que significa que o ciclo é repetido 9 vezes. Em todas estas iterações, os valores de D e H são calculados com base nos valores do respetivo ponto na época anterior, ou seja, por exemplo, para calcular o D e o H de um ponto num determinado perfil em 2040, é calculado o recuo em relação à posição do mesmo ponto em 2030.

No final do ciclo iterativo são exportados os valores finais de D e H de cada perfil efetuando a transformação inversa para o sistema de coordenadas (X,Y,Z) de modo a obter as coordenadas finais do MDT usado. Após todo este processo, cada um dos perfis transversais terá valores de cota simulados para cada uma das épocas, sendo possível após a sua validação, a criação de linhas de costa referentes aos diferentes horizontes temporais, bem como a interpolação dos pontos para a criação de um Modelo Digital de Terreno simulado.

3.7 Determinação das linhas de costa simuladas

O cálculo das linhas de costa é baseado na procura do primeiro ponto de cada perfil que atinge a cota do ME do respetivo ano de cálculo a partir do nível do mar do mesmo ano. É utilizado o primeiro ponto do perfil que atinge o ME, pois o ponto mais próximo do valor pretendido contabilizando todo o perfil, poderá ser bastante afastado da costa e sem relevância para a representação da linha de costa recuada. O processo de escolha do ponto representativo do ME é exemplificado no esquema presente na Figura 3.15.

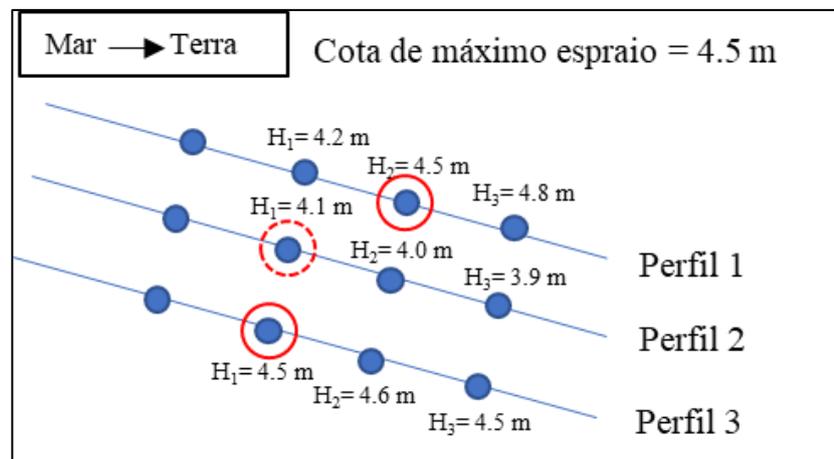


Figura 3.15 - Esquema da exemplificação da definição da Linha de Máximo Espraio

No esquema da Figura 3.15, observam-se três exemplos de escolha do ponto de máximo espraio por três razões distintas. No perfil 1, o H_2 é escolhido pela razão mais direta, é o primeiro ponto do perfil que detém a cota do máximo espraio, neste caso 4.5 m. No perfil 2, o algoritmo indica o H_1 como o ponto de máximo espraio pois, embora a sua cota seja consideravelmente inferior a 4.5 m, esta é a cota máxima no perfil, e então deverá ser escolhida para representar a linha de máximo espraio neste perfil. Finalmente, no perfil 3, é selecionado o ponto H_1 pois, embora o H_3 também tenha a cota do máximo espraio, o H_1 é o primeiro ponto do perfil, no sentido mar-terra, a deter a cota desejada. A ligação entre estes 3 pontos de cada perfil indicará a linha de máximo espraio nesta secção de costa.

Na Figura 3.16, encontram-se as linhas de costa em 2070, 2085 e 2100, na região da Costa Nova, correspondentes aos valores mínimo, médio e máximo do período climático de 30 anos do final do séc. XXI, juntamente com a linha de costa de 2010. A elas foi aplicado um filtro de suavização disponível

no *ArcGis*, de modo a corrigir alguns valores anómalos (*outliers*) obtidos durante a criação das linhas de máximo espraio.

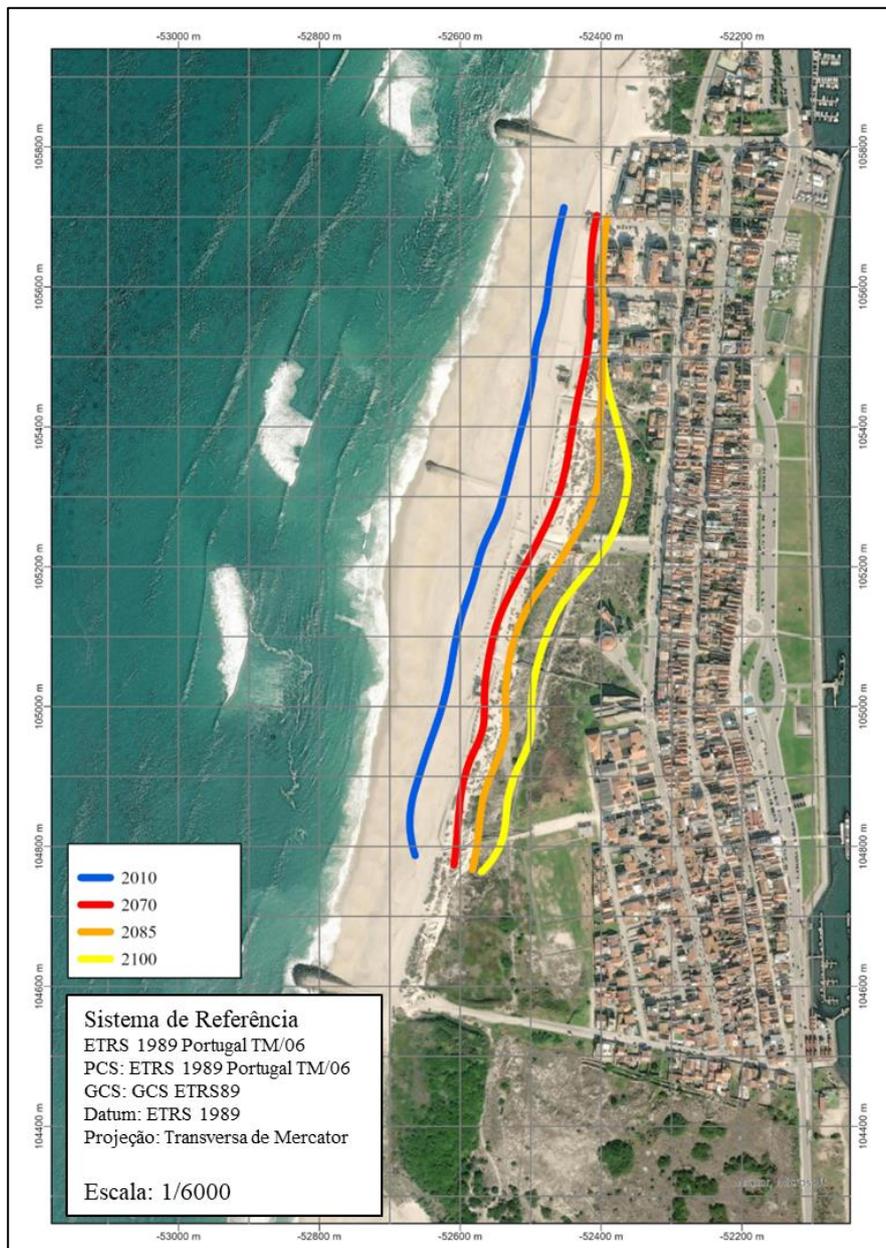


Figura 3.16 - Linhas de Costa calculadas para 2070, 2085 e 2100 comparadas com a linha de costa de 2010

3.8 Sensibilidade dos Parâmetros

A análise da sensibilidade dos parâmetros permite uma avaliação da influência de cada um nos resultados do método. Nem todos os parâmetros que são usados na abordagem semi-empírica da metodologia desenvolvida para a avaliação do recuo da LC, influenciam os resultados de forma relevante. Mas podem existir outros que são determinantes no ajuste da formulação matemática dessa abordagem e influenciam consideravelmente os resultados.

Os parâmetros cuja sensibilidade será analisada são:

- o D que varia em função da profundidade de fecho h^* , do H_{ref} e principalmente de um termo aditivo N que pode variar entre 150 e 300.

- o Y_1 que representa a extensão do depósito de sedimentos devido a *washover*. É definido pelo B_0 multiplicado por um fator k que pode ter valores entre 1.5 e 3.
- O F_e , fator de escala da função de elasticidade que varia entre 2 e 10.

Poderiam ter sido implementados outros métodos de análise da sensibilidade dos parâmetros, como a avaliação do valor do recuo segundo o método diferencial da sua fórmula, no entanto, optou-se por se produzir um código *python* que aplica a regra de *Bruun* aos perfis da Costa Nova, fazendo variar cada um dos parâmetros entre o seu valor máximo e mínimo, mantendo os valores médios dos restantes parâmetros. A avaliação da influência da variação do valor de cada um dos parâmetros no recuo da linha de costa foi efetuada quantificando a média das diferenças em cada perfil entre os diferentes valores que o parâmetro pode assumir, e o valor médio do mesmo parâmetro. Na Tabela 3.4, Tabela 3.5 e, Tabela 3.6 observa-se os resultados da análise da sensibilidade dos parâmetros D , k e F_e , respetivamente.

Tabela 3.4 - Análise da Sensibilidade do parâmetro D

D	150	175	200	225	250	275	300
Média das diferenças do recuo (m)	4.596	4.546	4.64	0	-0.063	-0.189	-0.229

Na análise da sensibilidade do parâmetro D , os valores abaixo do valor médio desse parâmetro, aumentam, em média, na ordem dos 4.5 m o recuo da linha de costa. Enquanto os valores acima de 225, diminuem muito ligeiramente o recuo médio da linha de costa.

Tabela 3.5 - Análise da Sensibilidade do parâmetro k

k	1	2	3
Média das diferenças do recuo (m)	-4.884	0	-2.839

No que toca ao k , a variação do seu valor entre o mínimo e o máximo apenas confere uma diminuição do recuo médio da linha de costa, sendo ligeiramente superior, no valor abaixo do valor médio.

Tabela 3.6 - Análise da Sensibilidade do parâmetro F_e

F_e	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Média das diferenças do recuo (m)	-52.222	-40.958	-28.736	-15.779	0	8.987	22.008	37.766	56.585

Finalmente, na análise do fator de escala da função de elasticidade, obtêm-se os resultados mais relevantes. A influência da variação deste parâmetro no recuo médio da linha de costa, quer na sua diminuição, quer no seu aumento, é bastante considerável. Podendo conferir acréscimos e decréscimos na ordem dos 50 m ao recuo calculado.

Assim, durante a validação dos resultados, a escolha do valor de cada um dos parâmetros, especialmente do F_e , poderá corrigir as linhas de costa obtidas, às linhas de costa provenientes de dados históricos. Deverá ter-se em conta, no entanto, aos intervalos de valores que cada parâmetro pode abranger, não sendo recomendável indicar valores aos parâmetros superiores ou inferiores aos seus limites máximo e mínimo.

3.9 Validação dos resultados

A validação de qualquer processo de modelação de um fenómeno físico é uma importante tarefa que legitima, ou não, as metodologias que se propõem para essa modelação. No âmbito do trabalho desta dissertação, poderiam ser aplicados métodos baseados na análise de séries temporais longas que quantificam o recuo da costa nesta região. No entanto, optou-se por seguir uma abordagem que passa pela aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho num MDT de uma época no passado, pretendendo-se obter a LC observada em 2010. Para este efeito, recorreu-se a um conjunto de fotografias aéreas da Costa Nova no ano de 1958.

As fotografias aéreas foram fornecidas pelo Centro de Informação Geoespacial do Exército (CiGeoE) e foram adquiridas a 12 de junho de 1958 durante o voo 3 realizado pela *United States Air Force* (USAF) numa área correspondente à carta militar 1:25000 184- Aveiro - Gafanha da Encarnação (Ílhavo). Na Figura 3.17 encontra-se um exemplo de uma das fotografias aéreas da região da Costa Nova durante este voo.



Figura 3.17 - Fotografia aérea 3148 do voo 3 da USAF sobre a área correspondente à carta 1:25000 184- Aveiro-Gafanha da Encarnação (Ílhavo)

Através das propriedades fotogramétricas da fotografia aérea e utilizando um bloco correspondente a 12 fotografias distribuídas por 6 fiadas que englobam a área da Costa Nova, São Jacinto, Ílhavo, Vagos e Gafanha da Encarnação, procedeu-se à geração de um Modelo Digital de Terreno da Costa Nova do ano de 1958 baseado no método fotogramétrico. Primeiro procedeu-se à coordenação de pontos fotogramétricos (PF's) em trabalho de campo, em localizações estratégicas no bloco de

fotografias. Os PF's localizam-se em locais que permaneceram inalteráveis desde a data do voo em 1958 e que são visíveis nas fotografias. O trabalho de campo realizou-se no dia 12 de julho de 2022, sendo medidos com recurso ao *Global Navigation Satellite System* (GNSS) um total de 9 pontos, em modo RTK, com apoio na rede RENEP. Para garantir a aerotriangulação do bloco de fotografias, quatro dos pontos localizam-se nos cantos do bloco e os restantes reservaram-se à zona da Costa Nova onde irá ser criado o MDT simulado. Na Figura 3.18 encontra-se o enquadramento geográfico dos PFs e na Tabela 3.7 as coordenadas obtidas na sua medição no terreno no sistema de referência ETRS89/PT-TM06. Nos cantos do bloco fotogramétrico, foram medidos dois pontos em cada local de modo a obter redundância.

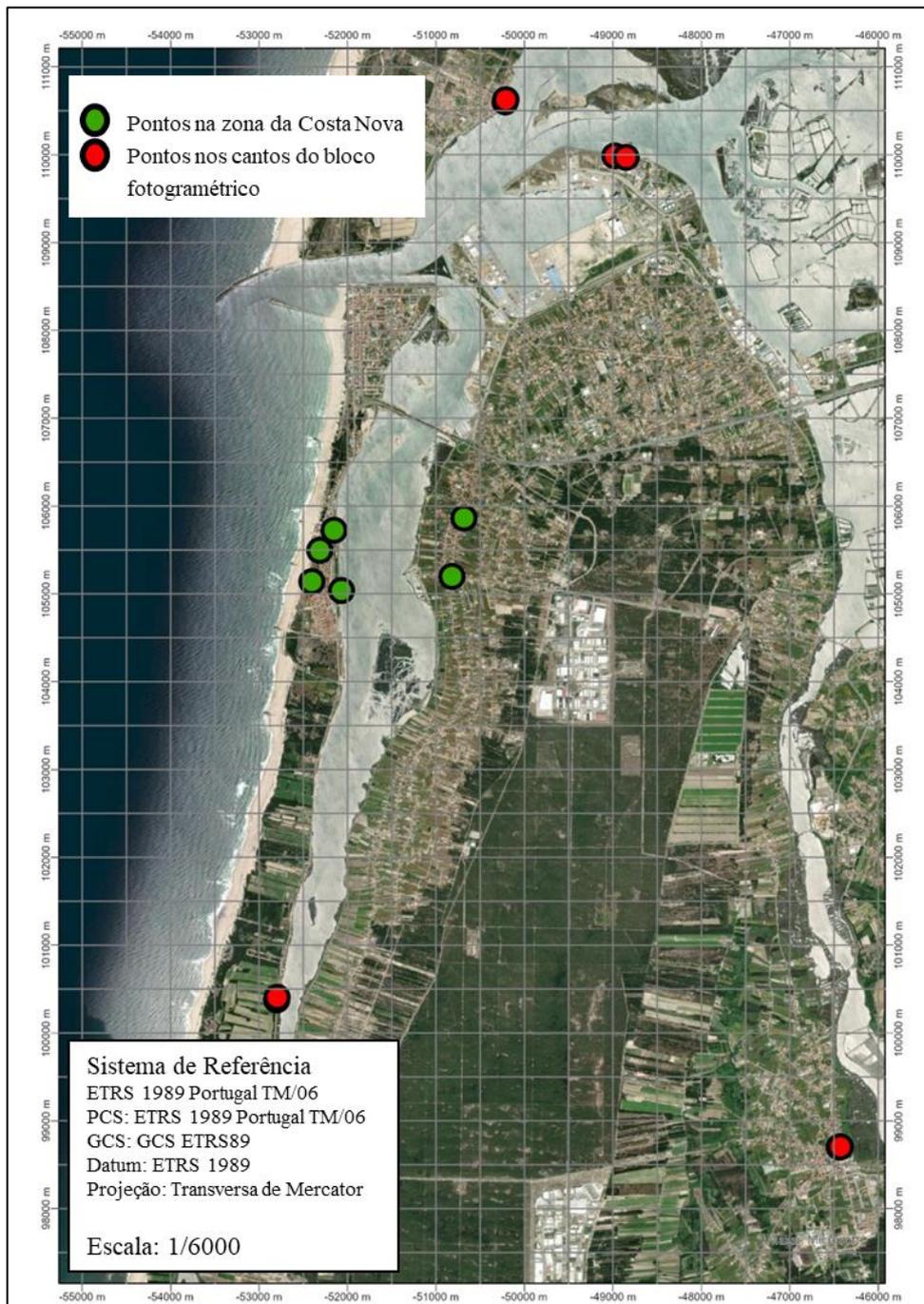


Figura 3.18 - Enquadramento geográfico da localização dos pontos fotogramétricos medidos no terreno durante o trabalho de campo

Tabela 3.7 - Coordenadas em ETRS89/PT-TM06 dos pontos fotogramétricos

PF		X (m)	Y (m)	Z (m)
CN1	CN1A	-52149.05	105739.73	2.63
	CN1B	-52152.97	105725.49	2.65
CN2	CN2A	-52300.33	105492.26	4.52
	CN2B	-52314.05	105496.48	4.68
CN3	CN3A	-52405.11	105139.01	3.61
	CN3B	-52396.05	105145.73	3.80
CN4	CN4A	-52065.39	105042.52	2.22
	CN4B	-52071.57	105042.30	2.22
GE	GE1	-50686.97	105226.80	4.24
	GE2	-50817.81	105211.32	3.83
GV	GV1	-52801.17	100393.81	3.70
	GV2	-52797.93	100420.36	3.78
SJ	SJ1	-50210.00	110624.16	2.16
	SJ2	-50219.33	110603.31	2.17
VA	VA1	-46440.94	98704.26	17.35
	VA2	-46432.43	98705.61	17.47
TGL	TGL1	-48850.84	109971.27	2.61
	TGL2	-48980.48	109990.43	2.54

Após a medição dos PF's no terreno, foi possível determinar a orientação externa do bloco de fotografias por aerotriangulação. Foram importadas as coordenadas dos PF's para o *software* Photomod⁵, e os mesmos foram medidos nas fotografias. A orientação interna da fotografia é obtida com os elementos que caracterizam a câmara 51-050 do manual de calibração de Spriggs (1966), neste caso a sua distância focal e as suas distorções radiais (Tabela 3.8).

Tabela 3.8 - Distância focal e distorções radiais da câmara que captou as fotografias aéreas

f	7.5°	15°	22.5°	30°	35°	40°	45°
152.42 mm	20.01 μm	40.84 μm	63.13 μm	87.99 μm	106.73 μm	127.89 μm	152.42 μm

Para além dos PF's para a determinação da orientação externa, procedeu-se ao ajustamento do bloco de fotografias com recurso a *Tie Points* (pontos de ligação), que consistem em pontos visíveis nas

⁵ Racurs (2022). "Photomod" Disponível em: <https://en.racurs.ru/program-products/photomod-lite/> (Acedido a 27/07/2022).

fotografias cujas coordenadas no terreno são ajustadas durante o ajustamento do bloco. Após esse ajustamento o bloco está georreferenciado e pronto para produzir o Modelo Digital de Terreno ou qualquer restituição de elementos topográficos.

O MDT foi obtido a partir de um conjunto de pontos automaticamente gerados por correlação radiométrica entre duas imagens. Para além destes pontos obteve-se a cota de pontos adicionados interactivamente por visão estereoscópica entre as duas fotografias que formam o modelo estereoscópico. A necessidade de produzir pontos adicionais provém do facto de em zonas homogéneas (sem contraste) como o areal da Costa Nova, a correlação radiométrica não funcionar corretamente, resultando na existência de áreas com escassez de pontos para modelar o terreno. Os dois conjuntos de pontos foram usados na produção de um modelo TIN o qual foi depois usado para a geração do MDT final. Na Figura 3.19 encontra-se o Modelo Digital de Terreno da Costa Nova para 1958, sobre uma das fotografias aérea da mesma época.

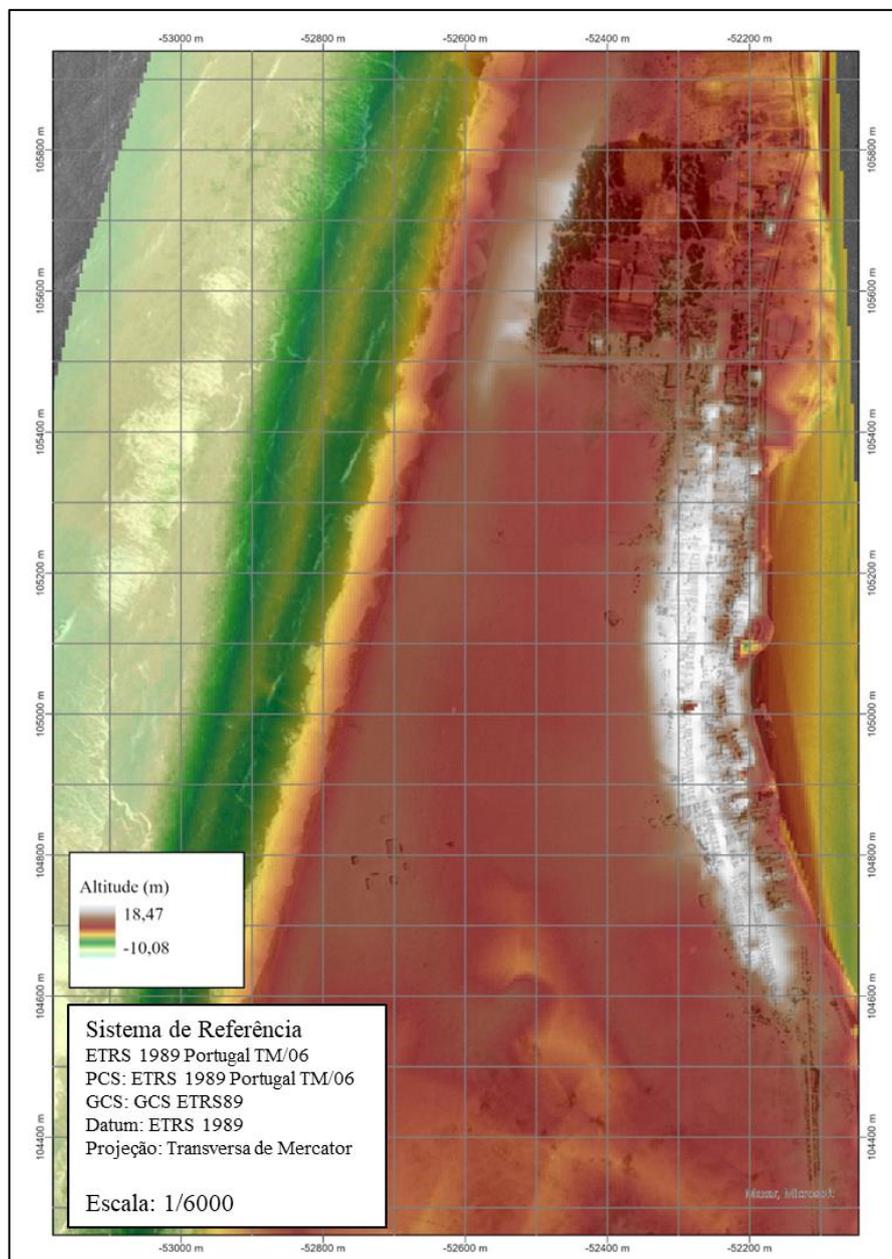


Figura 3.19 - Modelo Digital de Terreno da Costa Nova em 1958

intervenção de alimentação artificial na duna que alterou consideravelmente a topografia da praia. É possível verificar, na Figura 3.21, que na Zona Sul a duna presente em 1958 atingia a sua cota máxima perto dos 5 m, e que a topografia da praia para lá da duna se mantinha constante sem grandes alterações na sua cota. Por outro lado, o mesmo perfil em 2010 detém uma topografia bastante diferente, com uma cota máxima da duna a rondar os 10 m e uma altitude que se mantém elevada para lá da duna.

Além disso, comparando a fotografia aérea de 1958 e 2010, é evidente a presença de estruturas dunares artificiais em regiões que em 1958 eram ocupadas apenas por areal quase plano, colmatando nas diferenças vastas nas linhas de costa desta zona na Figura 3.20. Estas estruturas dunares são compatíveis com os passadiços e ripados mencionados em Souza et al. (2014).

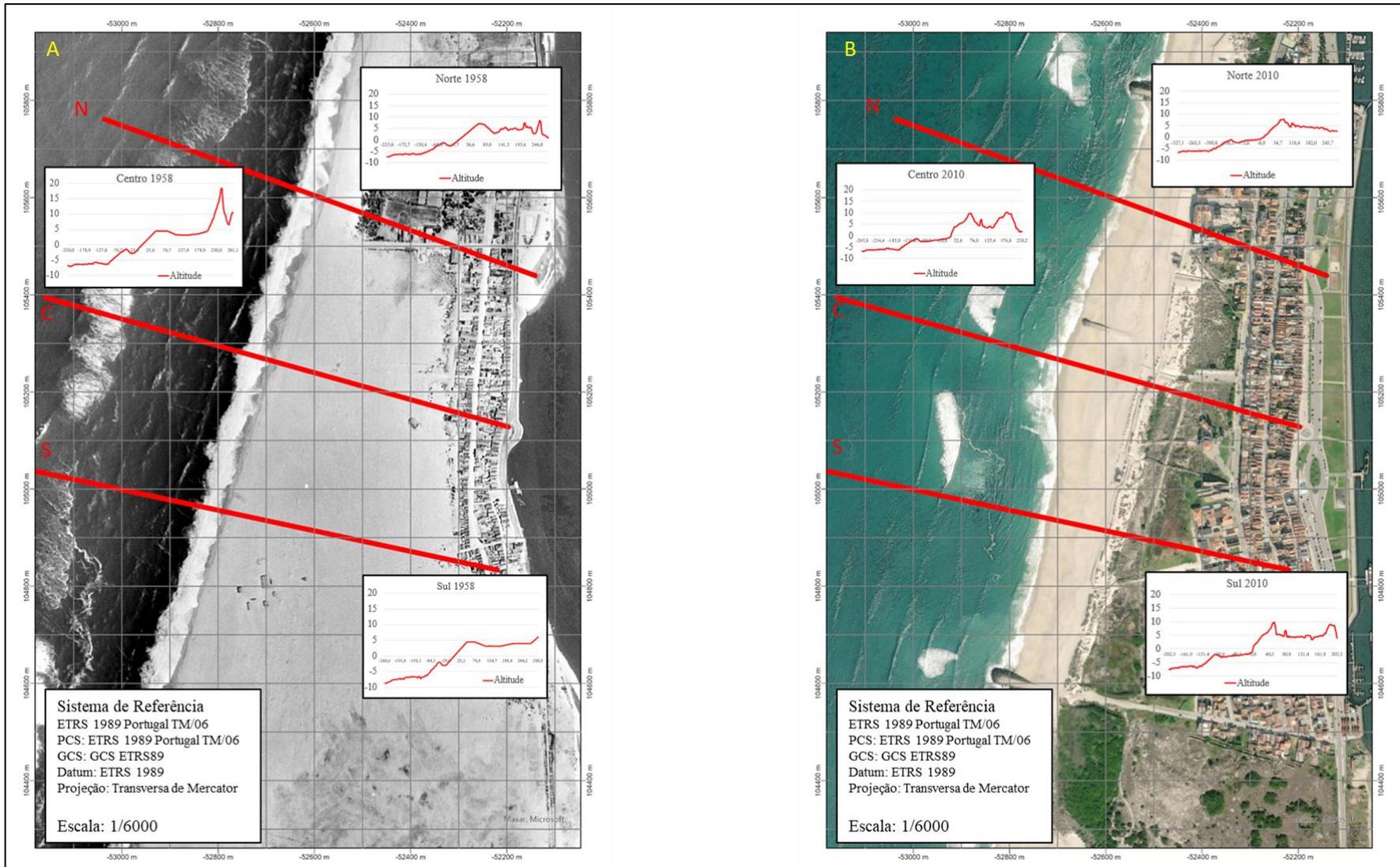


Figura 3.21 - Comparação dos perfis nas três secções consideradas, entre 1958 (A) e 2010 (B)

Na zona Norte, embora a duna detenha cota semelhante nas duas épocas, a topografia do terreno para lá da duna é ligeiramente diferente, provavelmente devido aos edificadros que se instalaram ao longos deste período de cerca de 50 anos.

Por fim, na zona Centro, na comparação entre as topografias nas duas épocas observam-se, mais uma vez, diferenças evidentes. O valor máximo de altitude da duna em 2010 é consideravelmente superior ao valor homólogo em 1958, ocorrendo depois um abaixamento de altitude, que é revertido mais tarde por uma segunda duna. Em 1958 a topografia do perfil é semelhante à do perfil, na mesma época, na região Centro existindo, no entanto, um pico considerável de altitude devido às infraestruturas edificadas que existiam naquela época.

A validação do algoritmo seria possível procedendo à alteração dos seus parâmetros, atendendo à análise da sua sensibilidade evidenciada no subcapítulo anterior, de modo a fazer coincidir a linha de costa obtida pelo algoritmo e a observada em 2010. Contudo, a alteração dos valores dos parâmetros, em particular a subida do F_e , impõe uma relevância excessiva no papel da subida do NMM no recuo da linha de costa. Segundo os dados de subida do NMM entre 1958 e 2010, essa subida foi mínima, tendo sido o recuo principalmente causado pelas infraestruturas de proteção costeira induzidas na Costa Nova durante este período, listadas em Pinto et al. (2018). Estas infraestruturas alteraram substancialmente a topografia da Costa Nova entre 1958 e 2010, o que torna impossível a validação da metodologia pela alteração do valor dos parâmetros sem impor o excessivo peso na subida do NMM para o cálculo do recuo, que é contrário à realidade observada. Assim, os passos seguintes foram efetuados segundo os resultados da Figura 3.16, sem ter sido efetuada a validação prevista anteriormente.

3.10 Modelo Digital de Terreno simulado para 2100

A partir dos perfis alterados pelo algoritmo é possível produzir um MDT simulado para o final do século XXI em que é calculado o recuo da costa. É efetuada uma interpolação dos pontos da área modificada pelos perfis até ao limite de alteração do recuo combinando-a com o MDT pré-existente dos dados iniciais. Com essa junção é gerado um novo modelo de terreno, um MDT híbrido com uma nova realidade do terreno traduzindo o recuo da costa. Na Figura 3.22, está representado o MDT da Costa Nova estimado para 2100, onde se destacam as transições entre o MDT elaborado com dados iniciais (valores do MDT de 2010) e o MDT resultante da metodologia seguida nesta dissertação.

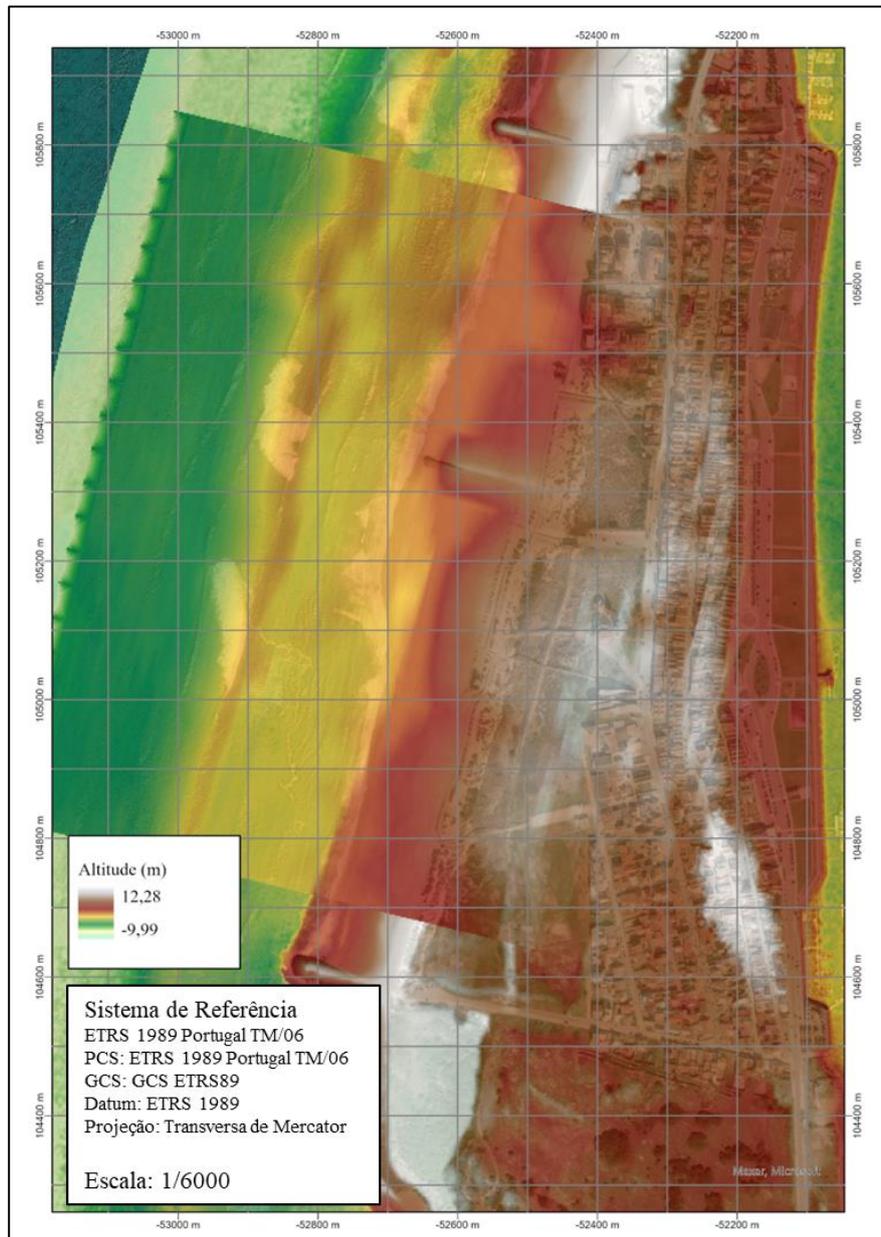


Figura 3.22 - Modelo Digital de Terreno da Costa Nova estimada para 2100, para a seção de costa processada

3.11 Cenário de Inundação Costeira Extrema

Uma das aplicações que pode ser dada ao MDT simulado é a sua aplicação para o cálculo de cenários de inundação costeira para 2100 sobre a cartografia com o modelo de terreno simulado de 2100. Previamente a aplicação destes cenários só era possível com topografia atual, contudo, com este MDT, obtém-se um cenário de inundação mais realista, permitindo uma melhor avaliação da vulnerabilidade e risco costeiro devido à subida do NMM.

A cartografia de inundação produzida neste trabalho, seguindo a metodologia desenvolvida por Antunes et al. (2019), mostram uma representação probabilística e não determinística dos cenários considerados. Nesta cartografia, os níveis de inundação causados pela sobrelevação da maré devido à subida do NMM e em situação de eventos meteorológicos extremos são apresentados na forma de probabilidade ou níveis de inundação provável. O Índice de Perigosidade de Inundação (IPI) é determinado a partir da incerteza dos níveis de inundação determinísticos e classificados na forma de

índice de perigosidade de inundação, com níveis de 1 a 5, correspondentes aos 5 intervalos de probabilidade de 20% de amplitude (Tabela 3.9). Dado que o intervalo de incerteza dos níveis extremos é centrado na estimativa central de uma dada projeção de subida de NMM, os níveis de probabilidade correspondem a uma probabilidade condicional. Diferentes projeções do NMM conduzem a diferentes amplitudes de inundação (cenários de inundação) para os mesmos níveis de probabilidade. As classes de perigosidade, com índice de 1 a 5, traduzem um nível de probabilidade de inundação e quando mapeadas sobre o terreno permitem identificar as zonas onde existe maior probabilidade de inundação em situação de eventos meteorológicos extremos (*ibid*).

Tabela 3.9 - Classificação do parâmetro "Forçamento Costeiro" no Índice de Perigosidade de Inundação, com base na probabilidade de cada cenário de inundação. [Fonte: Antunes et al. (2019)]

Índice de Perigosidade	Muito Baixo	Baixo	Moderado	Alto	Extremo
	1	2	3	4	5
Intervalo de Probabilidade	0.01% - 20%	20% - 40%	40% - 60%	60% - 80%	80% - 100%

O *set-up* de agitação marítima é inerente dos ambientes costeiros e é importante a sua consideração na criação de cenários de inundação costeira, no entanto, nas regiões que apenas poderão ser afetadas pelas inundações de águas interiores, como é o caso da Ria de Aveiro, não é necessária a consideração do *set-up* de agitação marítima. Assim, na Figura 3.23, encontra-se o cenário de inundação extrema sobre o MDT de 2100 na Costa Nova e considerando os efeitos do *set-up* nas regiões costeiras (A), desprezando-o nas regiões ribeirinhas (B).

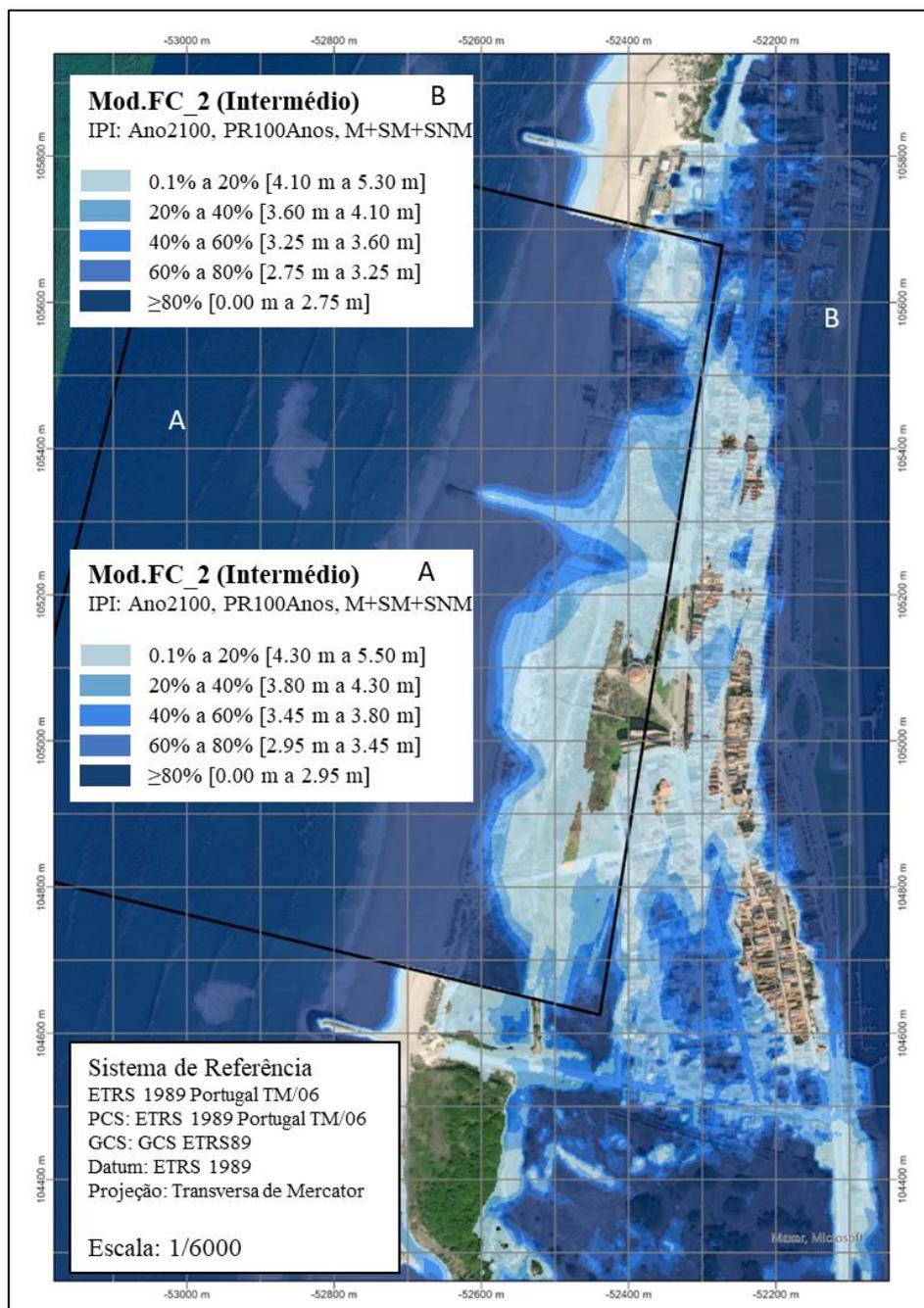


Figura 3.23 - Cenário de Inundação Extrema em 2100 com período de retorno de 100 anos sobre uma topografia de 2100 considerando os efeitos de set-up na zona costeira (A) e desprezando-o nas zonas ribeirinhas (B)

4 Discussão e Análise de Resultados

4.1 Avaliação do recuo da linha de costa entre épocas (atual e futura)

Entre outros, dos resultados da metodologia proposta, podemos quantificar o recuo da costa entre duas épocas (inicial e final), neste caso entre 2010 e 2100. Elaborando uma diferença dos recuos registados em cada perfil entre as duas épocas, verifica-se que, em média, poderá ocorrer um recuo na ordem dos 124 m, sendo que o perfil que identifica o maior recuo regista 172 m e o perfil que indica menor recuo regista 69 m. O recuo médio anual entre as duas épocas estima-se em cerca de 1.4 m/ano. A área contida na extensão geográfica entre as duas linhas de costa referentes à primeira e última data (Figura 4.1), corresponde a uma área equivalente a 117069.5 m² ou 11.7 ha.

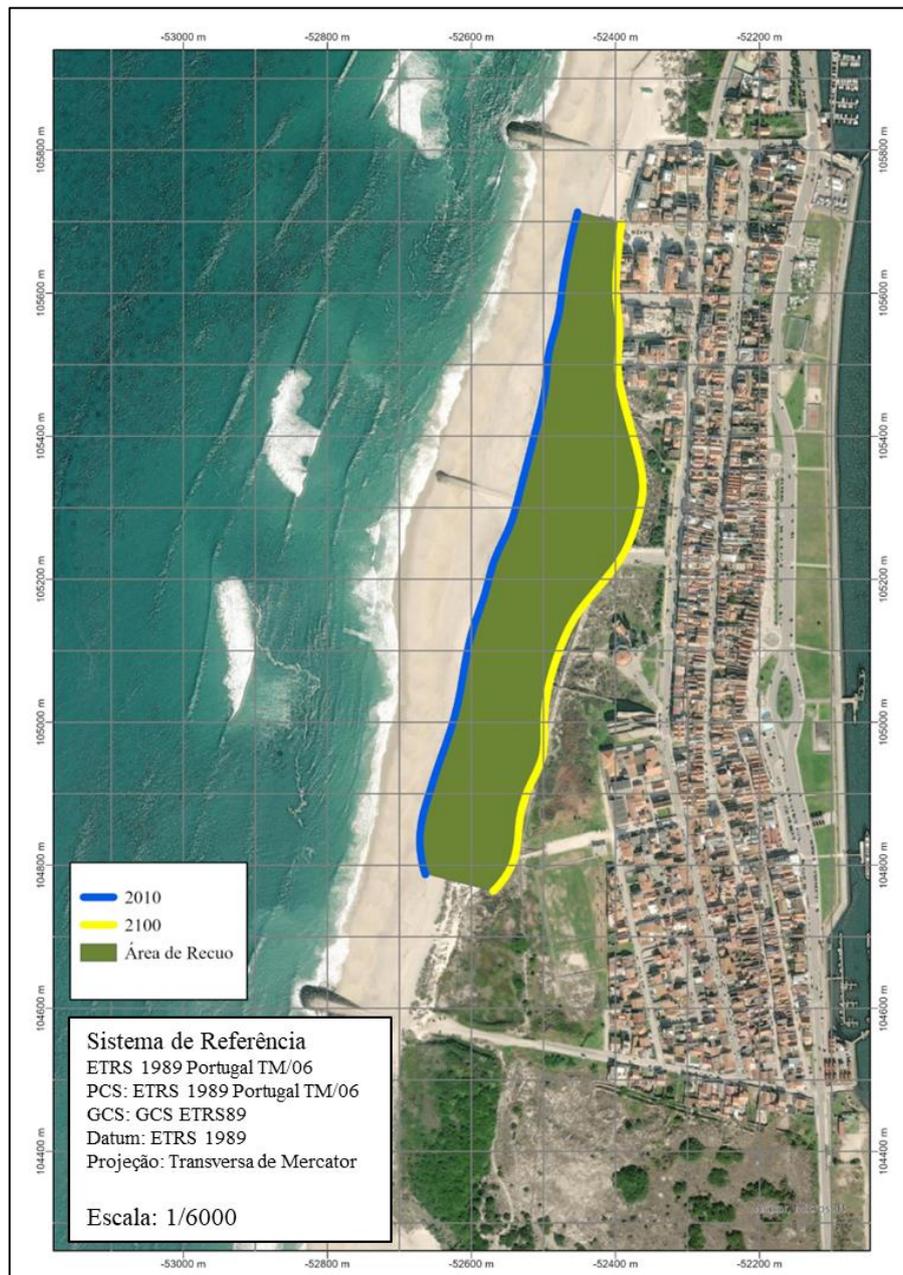


Figura 4.1 - Área de recuo entre a linha de costa atual e a linha de costa de 2100

Comparando a taxa de recuo de 1.4 m/ano obtida entre 2010 e 2100 e a taxa obtida em Ponte Lira et al. (2016) de 2.5 m/ano entre 1958 e 2010, nota-se uma diferença significativa na taxa de recuo anual entre os dois períodos temporais, que é quase o dobro uma da outra. Uma das possíveis razões para esta reduzida taxa de recuo em 2010-2100, poderá ser devido à não consideração do déficit sedimentar na implementação do algoritmo, reduzindo o recuo estimado. O recuo observado em Ponte Lira et al. (2016) considera o déficit sedimentar causado pelas intervenções costeiras “pesadas” na segunda metade do século XX, já que a subida do NMM foi apenas na ordem dos 6 cm para o período analisado, tal como foi observado no marégrafo de Cascais. O algoritmo descrito nesta dissertação não considera o efeito do déficit sedimentar que normalmente ocorre ao longo da costa portuguesa, o que poderá aumentar significativamente o recuo da costa, quando adicionado ao efeito da subida do NMM. No entanto, para esse efeito, os parâmetros do algoritmo, nomeadamente o F_e , deverão ser ajustados para aumentar o recuo obtido.

A necessidade da introdução do déficit sedimentar é evidente quando se comparam os resultados do recuo obtidos pelo algoritmo desta dissertação e por Ponte Lira et al. (2016) num período semelhante (1958-2010) (Figura 3.20), bem como, os resultados obtidos na tentativa de validação do presente método a partir do MDT aqui reproduzido de 1958. Sem a introdução da componente do déficit sedimentar, causado pelas infraestruturas de proteção costeira, é eliminada uma parte essencial do recuo da costa entre 1958 e 2010. Além disso, a subida do NMM entre estas duas épocas é bastante reduzida quando comparada com a subida considerada entre 2010 e 2100, o que reduz ainda mais o recuo de costa calculado pelo algoritmo. Adicionalmente, a abordagem tomada por Ponte Lira et al. (2016) considera como linha de costa, a berma da duna, que se localiza a uma distância em relação ao mar, inferior à linha de máximo de espraio considerada pelo algoritmo. Foi aplicado também nesta abordagem o método de georreferenciação direta das fotografias aéreas em vez do método aerofotogramétrico, o que reduz o rigor para este tipo de aplicação.

4.2 Avaliação da perda de sedimentos entre a época inicial e final

A determinação das alterações entre o MDT simulado e o MDT atual permite a produção de resultados que aferem sobre a volumetria de sedimentos perdidos pelo recuo. Na Figura 4.2 apresenta-se um mapa que representa, numa estrutura *raster*, a diferença entre o MDT da Costa Nova simulado para 2100 e o MDT de 2010, produzido a partir dos dados LiDAR.

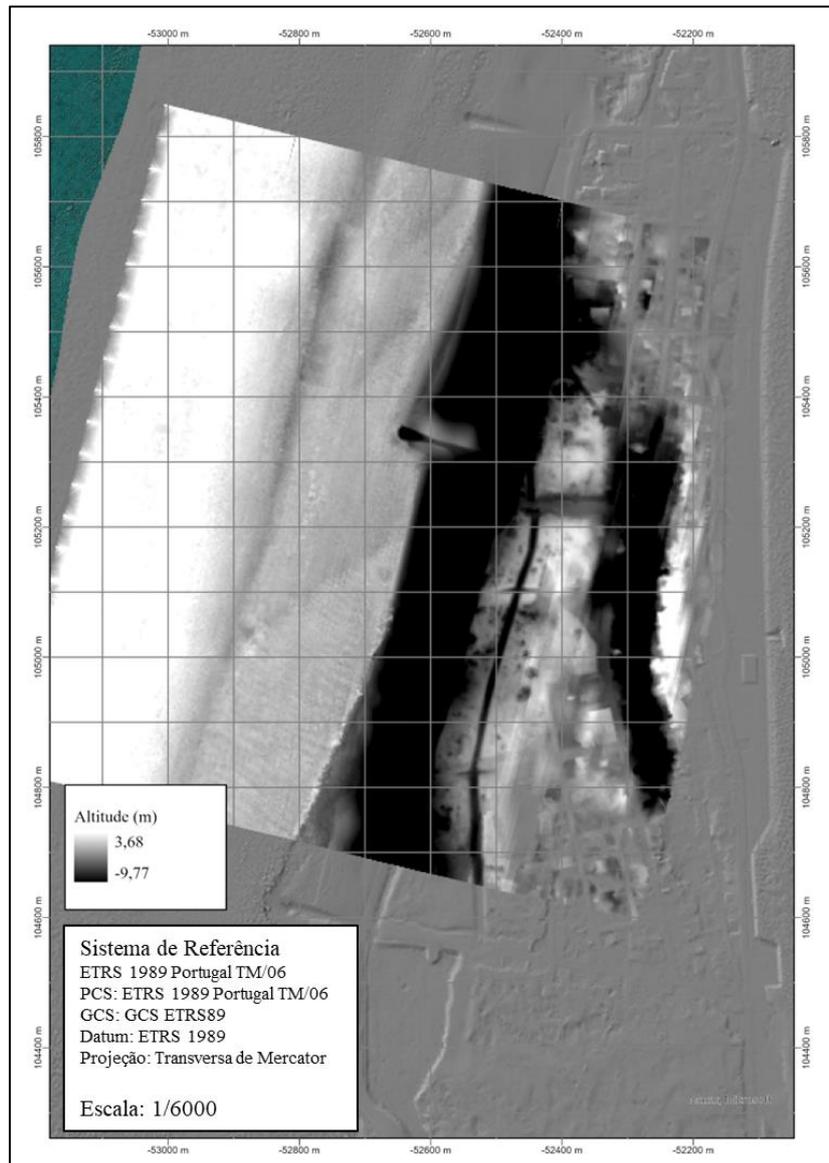


Figura 4.2 - Diferença entre o MDT de 2100 e de 2011 na Costa Nova

De modo a calcular o volume de sedimentos perdidos e ganhos na faixa costeira entre as duas épocas, é necessário isolar a região do *raster* acima, correspondente à área de recuo entre 2010 e 2100. No entanto, devido à natureza da formulação da *Bruun* modificada, não se pode ignorar o transporte de sedimentos *landward* durante o recuo, pois parte dos sedimentos que foram perdidos durante o recuo da costa podem ter sido depositados no sentido da duna, em vez de perdidos para o oceano. (Figura 4.3). Calculando o volume de sedimentos abaixo da superfície de referência de valor igual a 0 m efetuando o somatório dos valores de todos pixels com valor negativo e positivo multiplicando pela área que o pixel ocupa (4 m^2), obtém-se o volume de sedimentos ganho e perdido entre a época inicial e 2100.

O volume perdido de sedimentos nesta faixa costeira é de 655 mil m^3 , enquanto o volume ganho apenas é de 36 mil m^3 , o que significa que ocorre uma grande perda líquida de sedimentos na área emersa da praia entre as duas épocas, na ordem dos 629 mil m^3 correspondente a uma taxa anual de 70 mil m^3 por ano.

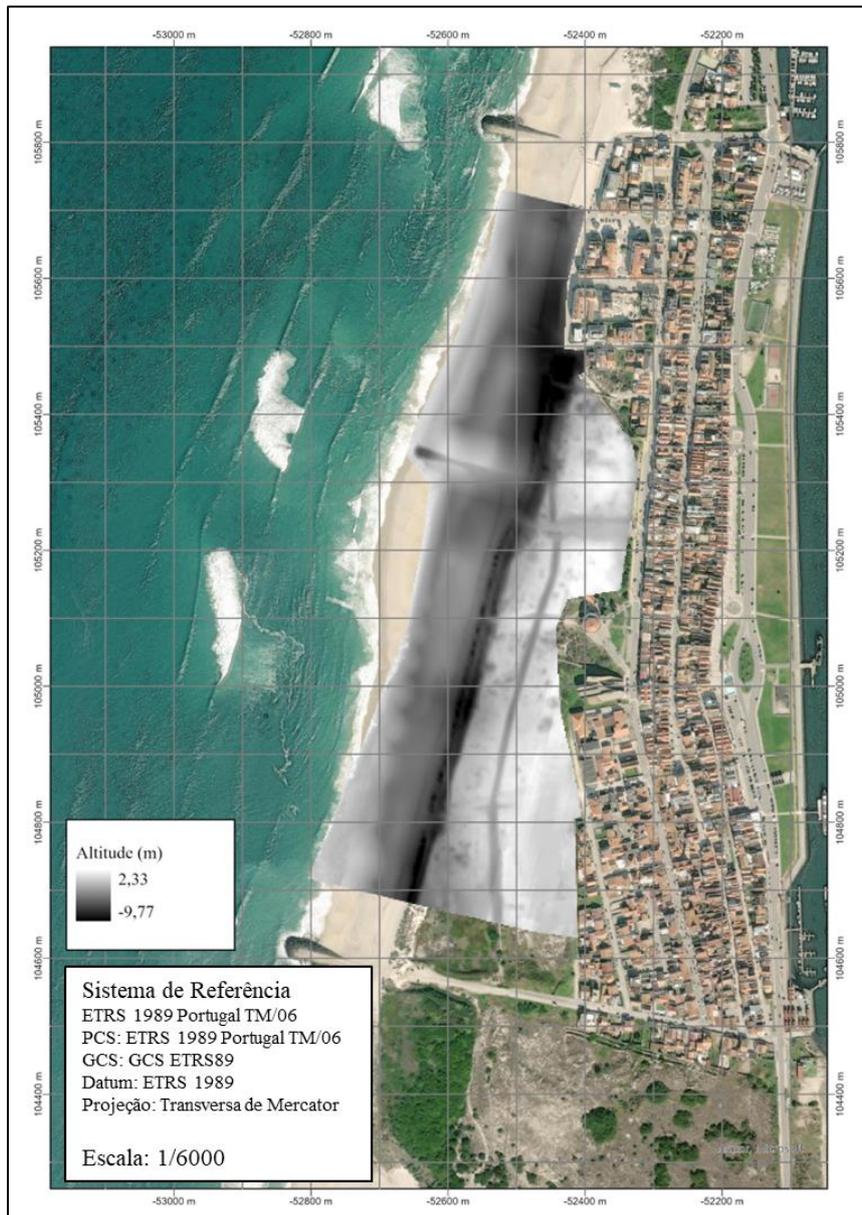


Figura 4.3 - Diferença entre o MDT de 2100 e o MDT atual na faixa costeira incluindo a duna

Segundo Prudêncio (2022) o metro cúbico de areia custa atualmente, seis euros em média, o que significaria que para repor os 629 mil m³ perdidos entre 2010 e 2100 seria necessário gastar cerca de 3.7 milhões de euros durante este período, o que corresponde a 42 mil euros por ano, apenas nesta secção da Costa Nova. Reforça-se que esta estimativa não considera a perda de sedimentos devido ao défice sedimentar.

4.3 Avaliação do Cenário de Inundação Extrema

O cenário de inundação extrema reproduzido na Figura 3.23 destaca-se por ser aplicado, por hipótese, a uma topografia congruente com a época do cenário, o que não é atualmente praticado, sendo o cenário de uma época futura aplicada à topografia atualmente conhecida. Comparando a Figura 4.4, que representa o cenário de inundação extrema em 2100 com um período de retorno da SM idêntico aos cenários previamente apresentados e considerando o efeito de *set-up* numa topografia atual, com o cenário representado na Figura 3.23, verifica-se que no cenário aplicado à topografia de 2100 é consideravelmente maior a quantidade de áreas afetadas pela inundação extrema. O facto de a

topografia ter sido afetada pelo recuo dos perfis transversais, significa que a área que contém uma cota abaixo das cotas dos 5 intervalos de probabilidade do índice de perigosidade é bastante maior. A inundação extrema do lado da costa, na Figura 4.4, é interrompida pela duna, no entanto, visto que a duna será alvo de grande erosão costeira e conseqüente recuo, quando o cenário de inundação extrema é aplicado à topografia alterada, a inundação sobrepõe as dunas em certas zonas, afetando as infraestruturas que atualmente são protegidas por elas.

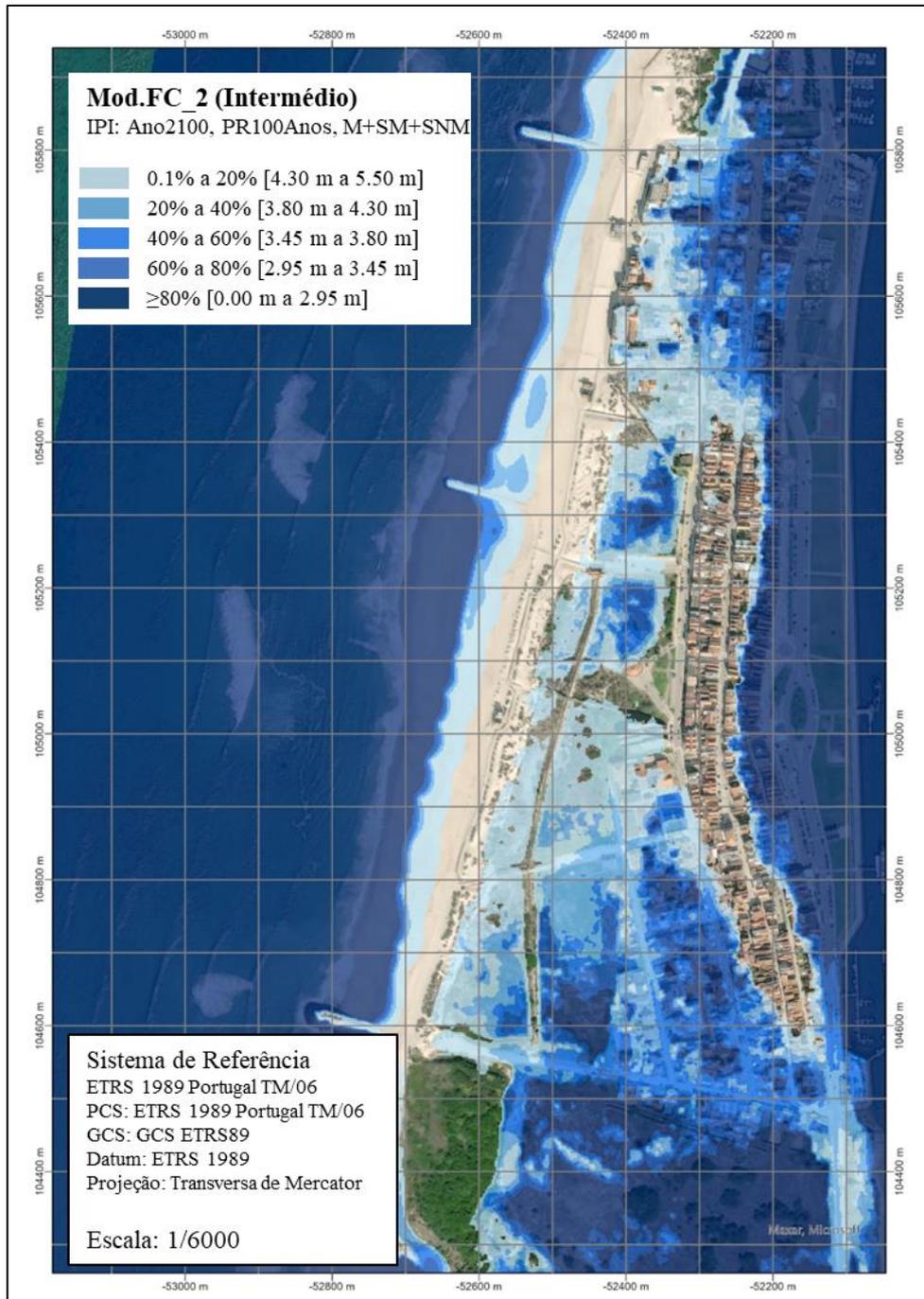


Figura 4.4 - Cenário de Inundação Extrema em 2100 com período de retorno de 100 anos sobre uma topografia de 2010 considerando os efeitos de *set-up* na zona costeira

5 Conclusões

5.1 Conclusões sobre os objetivos propostos

Os objetivos propostos inicialmente nesta dissertação foram:

1. Aplicar de forma sistematizada e automática uma metodologia para a determinação do recuo da linha de costa com recurso a princípios básicos da formulação modificada de *Bruun*, com intuito de: estimar o recuo da LC numa série de horizontes temporais, como consequência da subida do NMM; criar cenários de inundação sobre uma topografia futura, de modo a colmatar as incertezas dos cenários de inundação que utilizam uma topografia presente; estimar o volume de sedimentos acumulados ou perdidos na área de estudo como consequência do recuo da costa no período temporal considerado;
2. Testar a aplicabilidade da metodologia proposta, numa região costeira de Portugal Continental.;
3. Estudar a sensibilidade dos parâmetros usados na quantificação do recuo da costa e avaliar a sua influência nos resultados obtidos;
4. Validar a metodologia de cálculo da LC recorrendo à utilização de dados históricos de fotografia aérea, datados de 1958, a partir dos quais se procedeu à elaboração de modelos aerofotogramétricos, para posteriormente, através de técnicas fotogramétricas, se determinar a LC na data das fotografias. Aplicando-se posteriormente a metodologia proposta no ponto 1 dos objetivos e estimando a topografia atual, comparando-a por fim com a topografia real e atual da região teste;

No que toca ao primeiro objetivo, a metodologia descrita nesta dissertação determinou com sucesso o recuo da linha de costa utilizando os princípios da formulação modificada de *Bruun*. Foram criados cenários de inundação extrema sobre uma topografia de uma época futura, estimada uma LC para uma série de horizontes temporais e foram estimados volumes de sedimentos acumulados ou perdidos na área de estudo. Contudo, todos estes produtos estão condicionados pelo facto de a validação não ter sido devidamente concretizada.

A metodologia foi aplicada na região da Costa Nova, como foi inicialmente proposto, tendo sido comparado o recuo obtido com o estipulado por Ponte Lira et al. (2016). O recuo obtido entre 2010 e 2100 pelo algoritmo, rondou os 1.4 m/ano o que se revelou consideravelmente inferior ao obtido por Ponte Lira et al. (2016). A razão pela qual o recuo é inferior a essa referência, provém do facto do algoritmo não considerar o défice sedimentar que poderá ter ocorrido entre a época inicial e a final. Além disso, a consideração do máximo espraio como elemento definidor da LC e não a berma da duna, pode aferir resultados reduzidos ao recuo da linha de costa.

Em relação ao terceiro objetivo desta dissertação, a análise da sensibilidade dos parâmetros que constituem o algoritmo foi realizada de acordo com o previsto. A análise permitiu verificar a influência de cada um dos parâmetros nos resultados do recuo da costa, e concluiu-se que o parâmetro F_e influencia consideravelmente os resultados. Aumentando o valor deste parâmetro, aumenta o recuo até 50 m, enquanto diminuindo o seu valor reduz o recuo obtido também até 50 m.

Finalmente, a partir de modelos aerofotogramétricos, provenientes de dados históricos de fotografia aérea datados de 1958, foi feita uma tentativa de validar o método que, após análise dos resultados, evidenciou a necessidade de ajustamento da metodologia. Este ajustamento, nomeadamente para combater a não inclusão dos efeitos do défice sedimentar e as alterações antropogénicas na duna,

passaria pelo aumento da influência da subida do NMM no recuo da linha de costa, o que contrariaria com a realidade observada entre 1958 e 2010. Assim, a validação da metodologia não foi efetuada, sendo os seus resultados condicionados pela sua falta.

5.2 *Recomendações futuras*

O presente trabalho aborda uma metodologia relacionada com uma temática deveras importante, e que deve ser melhorada em trabalhos futuros, em particular na consideração de outros fatores impulsionadores do recuo de costa. Destacam-se ainda as seguintes recomendações para estudos futuros:

- Aplicar e testar a metodologia noutras secções de costa de Portugal Continental, em particular em diferentes tipos de costa, para que se possa aferir acerca da capacidade do algoritmo de se adaptar a diferentes ambientes costeiros e condições de maré e agitação marítima.
- Incorporar o efeito do défice sedimentar no algoritmo para calcular com maior exatidão o recuo da linha de costa. Nos resultados apresentados ao longo desta metodologia é considerado apenas o efeito da subida do NMM, no entanto em determinadas situações, como foi demonstrado durante o cálculo do recuo entre 1958 e 2010, a influência do défice sedimentar é maior do que a da subida do NMM.
- Validar o algoritmo também com dados de marés, agitação marítima e de dinâmica geológica, de modo a combinar a automatização que esta metodologia impõe no cálculo do recuo da costa com a precisão dos dados naturais tradicionalmente utilizados nos métodos baseados em processos.

6 Referências Bibliográficas

- Al-Mashidani, G., Pande, L., Mujda, F., 1978. A simple version of Gumbel's method for flood estimation. *Hydrological Sciences* 23, 373–380.
- Andrade, C., Pires, H., Silva, P., Tabora, R., Freitas, M.C., 2006. Zonas Costeiras, in: Santos, F.D., Miranda, P. (Eds.), *Alterações Climáticas Em Portugal. Cenários, Impactes e Medidas de Adaptação – SIAM II*. Gradiva, Lisboa, Portugal, pp. 169–206.
- Antunes, C., 2019. Assessment of Sea Level Rise at West Coast of Portugal Mainland and Its Projection for the 21st Century. *JMSE* 7, 61. <https://doi.org/10.3390/jmse7030061>
- Antunes, C., 2017. Metodologia de Aplicação da Regra de Recuo da Linha de Costa à Modelação do MDT - Regra de Bruun modificada.
- Antunes, C., 2014. Eventos extremos e a variação do nível do mar, in: *Atas Das 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Presented at the 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisboa, Portugal, pp. 33–36.
- Antunes, C., 2012. Implicação da subida do NMM na necessidade de revisão dos sistemas de referência verticais, in: *Actas Do 3º Encontro Nacional de Geodesia Aplicada*. Presented at the 3º Encontro Nacional de Geodesia Aplicada, LNEC, Lisboa, pp. 33–36.
- Antunes, C., Rocha, C., Catita, C., 2019. Coastal Flood Assessment due to Sea Level Rise and Extreme Storm Events: A Case Study of the Atlantic Coast of Portugal's Mainland. *Geosciences* 9, 239. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050239>
- Araújo, A., 2018a. Aula 4: Marés - Apontamentos das aulas de Geomorfologia.
- Araújo, A., 2018b. Aula 5: Variações do nível do mar.
- Araújo, M.A., 1991. *Evolução geomorfológica da plataforma litoral da região do Porto (Doutoramento)*. Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Ashton, A.D., Murray, A.B., 2006. High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits, and capes. *J. Geophys. Res.* 111, F04011. <https://doi.org/10.1029/2005JF000422>
- Ashton, A.D., Murray, A.B., Arnault, O., 2001. Formation of coastline features by large-scale instabilities induced by high-angle waves. *Nature* 414, 296–300.
- Balmforth, N., Mandre, S., 2004. Dynamics of roll waves. *Journal of Fluid Mechanics* 514, 1–33.
- Bednar-Friedl, B., Biesbroek, R., Schmidt, D.N., 2022. IPCC Sixth Assessment Report (AR6): Climate Change 2022-Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Factsheet Europe (Assessment Report). IPCC, Switzerland.
- Bird, E.C.F., 1987. The modern prevalence of beach erosion. *Marine Pollution Bulletin* 18, 151–157. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(87\)90238-4](https://doi.org/10.1016/0025-326X(87)90238-4)
- Bolle, A.J., Mercelis, P., Roelvink, D., Haerens, P., Trouw, K., 2011. Application and validation of XBeach for three different field sites. *Coastal Engineering Proceedings* 40.
- Bowen, A.J., Inman, D.L., Simmons, V.P., 1968. Wave 'set-down' and set-Up. *J. Geophys. Res.* 73, 2569–2577. <https://doi.org/10.1029/JB073i008p02569>
- Bruun, P., 1988. The Bruun Rule of erosion by sea level rise: a discussion on large-scale two- and three-dimensional usages. *Journal of Coastal Research* 4, 627–648.
- Bruun, P., 1954. *Coast erosion and the development of beach profiles (Technical Memorandum No. 44)*. Beach Erosion Board, Washington DC, USA.
- Cabral, J., 1995. Neotectónica em Portugal Continental. *Inst. Geol. Min. Mem* 31, 265.
- Câmara Municipal de Ílhavo, 2020. *Diagóstico Social do Concelho de Ílhavo*, in: *Diagnóstico Social - Teorias, Metodologia e Casos Práticos*. Edições Sílabo, Ílhavo, Portugal.
- Carvalho, J.J.R., Barceló, J.P., 1966. *Agitação Marítima na Costa Oeste de Portugal Metropolitano - Contribuição Para o Seu Estudo*. Ministério das Obras Públicas, LNEC, Lisboa.
- Church, J.A., White, N.J., 2011. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surveys in geophysics* 32, 585–602.
- Coelho, C., 2005. *Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira (Doutoramento)*. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

- Cooper, A., McKenna, J., O'Hagan, A.M., 2008. Managing by principle: A critical analysis of the European principles of Integrated Coastal Zone Management (ICZM). *Marine Policy* 32, 941–955. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2008.02.005>
- Costa, M., Silva, R., Vitorino, J., 2001. Contribuição para o estudo do clima de agitação marítima na costa portuguesa, in: *Actas Das 2as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira* 2as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira. Presented at the 2as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira, Sines, Portugal.
- Dabees, M., Kamphuis, J.W., 2000. Nline: efficient modeling of 3-d beach changes. *Coastal Eng* 3, 2700–2713.
- Daveau, S., 1998. Portugal Geográfico, in: *Portugal Geográfico*. Lisboa, Portugal, p. 224.
- Davidson-Arnott, R., 2005. A conceptual model of the effects of sea level rise on sandy coasts. *Journal of Coastal Research* 21, 1166–1172.
- Davidson-Arnott, R., Bauer, B., Houser, C., 2019. Introduction to coastal processes and geomorphology. Cambridge University Press, Cambridge. UK.
- Davison, A.C., Hinkley, D.V., 1997. *Bootstrap Methods and their Application*. Cambridge University Press, Cambridge. UK.
- Dean, R., Collins, I., Divoky, D., Hatheway, D., Scheffner, N., 2005. Wave setup: FEMA coastal flood hazard analysis and mapping guidelines (Focused Study Report).
- Dean, R.G., Maurmeyer, E.M., 1983. Models for beach profile response, in: Komar, P.D. (Ed.), *Handbook of Coastal Processes and Erosion*. Boca Raton, Florida, USA, pp. 161–166.
- Dias, J.M.A., 2009. Alguns exemplos de rápida evolução costeira em Portugal, in: *Actas Da VII Reunião Do Quaternário Ibérico*. Presented at the VII Reunião do Quaternário Ibérico, Faro, Portugal, pp. 17–21.
- Dias, J.M.A., Bastos, M.R., Bernardes, C., Freitas, J.G., Martins, V., 2012. Interações Homem-Meio em zonas costeiras: O caso de Aveiro, Portugal, in: Rodrigues, M.A.C., Pereira, S.D. (Eds.), *Baía de Setúbal: Estado Da Arte*. Corbã, Brasil, pp. 215–235.
- Dias, J.M.A., Ferreira, Ó., Pereira, A.R., 1994. Estudo sintético de diagnóstico da geomorfologia e da dinâmica sedimentar dos troços costeiros entre Espinho e Nazaré. ESAMIN, Lisboa, Portugal.
- Dias, J.M.A., Taborda, R., 1988. Evolução Recente do nível médio do mar em Portugal. *Anais do Instituto Hidrográfico* 9, 83–97.
- Direção Geral do Território, 2018. Carta de Uso e Ocupação do Solo para 2018 | DGT [WWW Document]. URL <https://www.dgterritorio.gov.pt/Carta-de-Uso-e-Ocupacao-do-Solo-para-2018> (accessed 2.8.22).
- Dissanayake, P., Brown, J., 2022. Modelling the effect of ‘roller dynamics’ on storm erosion: Sylt, North Sea. *Journal of Marine Science and Engineering* 10, 305.
- Evans, J.L., Guishard, M.P., 2009. Atlantic subtropical storms. Part I: Diagnostic Criteria and composite analysis. *American Meteorological Society* 137, 2065–2080.
- Everts, C.H., 1985. Sea level rise effects. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, American Society of Civil Engineers 111, 985–999.
- Falqués, A., 2006. Wave driven alongshore sediment transport and stability of the Dutch coastline. *Coastal Eng* 53, 243–254.
- Falqués, A., Calvete, D., 2005. Large-scale dynamics of sandy coastlines: Diffusivity and instability: DYNAMICS OF SANDY COASTLINES. *J. Geophys. Res.* 110. <https://doi.org/10.1029/2004JC002587>
- Falqués, A., Calvete, D., 2003. Propagation of coastline sand waves, in: *Proc. 3rd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*. Presented at the 3rd IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Barcelona, Spain, pp. 903–912.
- Falqués, A., Garnier, R., Ojeda, E., Ribas, F., Guillen, J., 2019. Q2D-morfo: a medium to long term model for beach morphodynamics, in: *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics RCEM 2007*. CRC Press, Enschede, Netherlands.
- Ferreira, B., 1978. Planaltos e Montanhas do Norte da Beira - Estudo de Geomorfologia. Centro de Estudos Geográficos, Lisboa, Portugal.
- Gomes, A., 2008. Evolução geomorfológica da plataforma litoral entre Espinho e Águeda (Doutoramento). Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

- Granja, H., Carvalho, G.S., 1992. Coastal Dunes, in: Carter, R., Curtis, T., Sheehyskeffington, A. (Eds.), *Dunes and Holocene Deposits of the Coastal Zone of Portugal, North Mondego Cape. Geomorphology, Ecology and Management for Conservation*, Rotterdam, Netherlands, pp. 43–50.
- Gulev, S.K., Zolina, O., Grigoriev, S., 2001. Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data. *Climate Dynamics*, SpringerVerlag 17, 795–809.
- Hamm, L., Capobianco, M., Dette, H.H., Lechuga, A., Spanhoff, R., Stive, M.J.F., 2002. A summary of European experience with shore nourishment. *Coastal Eng* 47, 237–264.
- Horikawa, K., 1988. *Nearshore Dynamics and Coastal Processes*. University of Tokyo Press, Tokyo, Japan.
- Inman, D.L., 1987. Accretion and erosion waves on beaches. *Shore and Beach* 55, 61–66.
- insar.sk, 2023. InSAR Technology [WWW Document]. URL <http://insar.space/insar-technology/> (accedido a 3.30.23).
- Instituto Hidrográfico, 2016. *Ciencia Marinha* [WWW Document]. URL <https://www.hidrografico.pt/>
- Instituto Português do Mar e Atmosfera, 2022. Instituto Português do Mar e da Atmosfera [WWW Document]. Área educativa - CLIMA DE PORTUGAL CONTINENTAL. URL <https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/> (accessed 9.30.22).
- IPCC, 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, in: Portner, H.O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., Rama, B. (Eds.), *Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge. UK.
- Joly, F., 1997. *Glossaire de géomorphologie – Base de données sémiologiques pour la cartographie*. Armand Colin, Paris, France.
- Komar, P.D., 1998. *Beach Processes and Sedimentation*, 2nd ed. Prentice Hall, USA.
- Koppen, W., 1931. *Grundriss der Klimakunde*. Walter de Gruyter 388.
- Martins, C.A.F.B., 2012. A barra da laguna de Aveiro no século XIX: impactos da ação antrópica na dinâmica lagunar (Mestrado). Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Martins, H., Veloso-Gomes, F., 2011. Alimentação artificial de praias em ambientes energéticos Intermédios, in: *Actas Das 6.as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*. Presented at the 6.as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Porto, Portugal, pp. 29–40.
- National Hurricane Center, 2022. Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale [WWW Document]. URL <https://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php> (accessed 10.3.22).
- Nicholls, R.J., Richards, J., Bosello, F., Roson, R., 2009. *Climate change impacts in Europe. Final report of the PESETA research project*. Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies, Spain.
- Nicholls, R.J., Wong, P.P., Burkett, V.R., Codignotto, J.O., Hay, J.E., McLean, R.F., Ragoonaden, S., Woodroffe, C.D., 2007. Coastal systems and low-lying areas, in: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Eds.), *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, pp. 315–356.
- Peña Monné, J.L., Pellicer Corellano, F., Chuenca Cía, J., Julián Andrés, A., 1997. Leyendas para mapas geomorfológicos a escalas 1:100.000/1:200.000 y 1:25.000/1:50.000, in: Peña Monné, J.L. (Ed.), *Cartografía Geomorfológica Básica y Aplicada*. Geofoma Ediciones, Logroño, Spain, pp. 127–143.
- Pilkey, O.H., Davis, T.W., 1987. An analysis of coastal recession models: North Carolina Coast, in: Nummedal, D., Pilkey, O.H., Howard, J. (Eds.), *Sea-Level Fluctuations And Coastal Evolution*. SEPM, Tucson, Arizona, USA, pp. 59–68.
- Pinto, C.A., Silveira, T.M., Teixeira, S.B., 2018. Alimentação artificial de praias na faixa costeira de Portugal Continental: Enquadramento e retrospectiva das intervenções realizadas (1950-2017). (Relatório Técnico). Agência Portuguesa do Ambiente.

- Ponte Lira, C., Nobre Silva, A., Taborda, R., Freire de Andrade, C., 2016. Coastline evolution of Portuguese low-lying sandy coast in the last 50 years: an integrated approach. *Earth Syst. Sci. Data* 8, 265–278. <https://doi.org/10.5194/essd-8-265-2016>
- Prudêncio, J., 2022. Reposição de areias está a conseguir parar recuo da costa. *Jornal do Algarve*.
- Redweik, P., 2021. Produção Cartográfica - Apontamentos das aulas de Produção Cartográfica.
- Rocha, C., 2016. Estudo e análise da vulnerabilidade costeira face a cenários de subida do nível do mar e eventos extremos devido ao efeito das alterações climáticas (Mestrado). Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Roelvink, J.A., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., Lescinski, J., 2009. Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering* 1133–1152.
- Roelvink, J.A., Van Banning, G.K.F.M., 1994. Hydroinformatics: Design and Development of DELFT3D and Application to Coastal Morpho-dynamics, in: Verwey, A., Minns, A.W., Babovic, V., Maksimovic, C. (Eds.), *Hydroinformatics: Design and Development of DELFT3D and Application to Coastal Morpho-Dynamics*. Balkema, Netherlands, pp. 451–456.
- Rogers, J.C., 1997. North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of Northern Europe. *American Meteorological Society* 10, 1935–1947.
- Rosati, J.D., 2005. Concepts in sediment budgets. *Journal of Coastal Research* 21, 307–322.
- Rosati, J.D., Dean, R.G., Walton, T.L., 2013. The modified Bruun Rule extended for landward transport. *Marine Geology* 340, 71–81.
- Rosen, P.S., 1978. A regional test of the Bruun Rule on shoreline erosion. *Marine Geology* 26, M7–M16.
- Ruessink, B.G., Jeuken, M.C.J.L., 2002. Dunefoot dynamics along the dutch coast. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 1043–1056.
- Santos, F.D., Miranda, P., 2006. Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactes e Medidas de Adaptação – SIAM II. Gradiva, Lisboa, Portugal.
- Schwartz, M.L., 1987. The Bruun Rule—twenty years later. *Journal of Coastal Research* 3, ii–iv.
- Schwartz, M.L., 1967. The Bruun theory of sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Geology* 75, 76–92.
- Sci-News, 2021. LiDAR Reveals 478 Olmec and Maya Ceremonial Complexes in Mexico. *Sci-News*.
- Sherman, D., Davis, L., Namikas, S.L., 2013. 1.13 Sediments and Sediment Transport, in: Shroder, J., Orme, A.R., Sack, D. (Eds.), *Treatise on Geomorphology*. Elsevier, pp. 233–256.
- Silva, A., Freire, E., Crisóstomo, G., 2008. Variações do nível médio anual do mar em Cascais: Características e Tendências. *Estudos do Quaternário* 5, 51–66.
- Sistema Nacional de Informação de Ambiente, 2022. Sistema Nacional de Informação dos Recursos do Litoral | SNIAMB [WWW Document]. URL <https://sniamb.apambiente.pt/content/sistema-nacional-de-informa%C3%A7%C3%A3o-dos-recursos-do-litoral?language=pt-pt> (accessed 11.14.22).
- Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, 2022. SNIRH > Dados de Base [WWW Document]. URL <https://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=2&idItem=1&objCover=920123704&objSite=920685506> (accessed 9.30.22).
- Sousa, N., Trindade, J., Ramos Pereira, A., 2015. Dinâmica de um indicador de linha de costa no arco Caparica-Espichel: caso de estudo da Fonte da Telha, in: *Actas Do VII Congresso Nacional de Geomorfologia*. Presented at the VII Congresso Nacional de Geomorfologia, Associação Portuguesa de Geomorfólogos, pp. 81–89.
- Souza, T.A., Vieira, A., Oliveira, R.C., 2014. Alterações do relevo no litoral da laguna de Aveiro: estudo a partir da cartografia geomorfológica, in: *Actas Do XIV Colóquio Ibérico de Geografia*. Presented at the XIV Colóquio Ibérico de Geografia, Guimarães, Portugal.
- Spriggs, R., 1966. *The Calibration of Military Cartographic Cameras*. Wright-Patterson Air Force, Ohio, USA.

- Steezel, H.J., de Vroeg, J.H., van Rijn, L.C., Stam, J.M., 1998. Morphological modelling using a modified multi-layer approach. *Coastal Eng* 2368–2381.
- Thevenot, M.M., Kraus, N.C., 1995. Longshore sandwaves at Southampton Beach, New York: observations and numerical simulation of their movement. *Mar. Geology* 126, 249–269.
- Thurman, H.V., 1997. *Introductory Oceanography*. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Titus, J.G., 1986. Greenhouse effect, sea level rise, and coastal zone management. *Coastal Zone Management Journal* 14, 147–171.
- Tricart, J., 1965. *Principes et méthodes de la géomorphologie*. Masson, Paris, France.
- USAID, 2009. *Adaptation to Coastal Climate Change - A Guidebook for Development Planners*. U.S. Agency for International Development (USAID), Washington DC, USA.
- van Rijn, L.C., Tonnon, P.K., Walstra, D.J.R., 2011. Numerical modelling of erosion and accretion of plane sloping beaches at different scales. *Coastal Engineering* 58, 637–655.
- Vieira, R., Antunes, C., Taborda, R., 2012. Caracterização da sobrelevação meteorológica em Cascais nos últimos 50 anos, in: *Actas Das 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Presented at the 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisboa, Portugal, pp. 21–24.
- Vousdoukas, M.I., Athanasiou, P., van Dongeren, A., Giardino, A., Ranasinghe, R., Kwadijk, J., 2020. Uncertainties in projections of sandy beach erosion due to sea level rise: an analysis at the European scale. *Sci Rep* 10, 11895. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68576-0>