U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO

MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2021/2022

AVALIAÇÃO DO RISCO DE GALGAMENTO COSTEIRO NA PRAIA FORMOSA, MADEIRA, CONSIDERANDO CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

MIRIAM ISABEL CAIRES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Presidente do Júri: Adrián Manuel Tavares da Silva
Professor Associado do Departamento de Engenharia Química
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Orientador: Professor Doutor Luciana Paiva das Neves
Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Civil
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Coorientador: Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos
Professor Associado com Agregação no Departamento de Engenharia Civil
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

SETEMBRO DE 2022

MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2021/2022

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Tel. +351-22-508 1884

Fax +351-22-508 1449

✉ mjmota@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌍 http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia do Ambiente - 2021/2022 - Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha mãe

Por vezes sentimos que aquilo que fazemos
não é senão uma gota de água no mar.
Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.
Madre Teresa de Calcutá

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a todos os que me acompanharam e apoiaram ao longo do meu percurso de vida, contribuindo assim para o meu crescimento pessoal, e a todos os que contribuíram para o meu percurso académico e para a elaboração desta dissertação.

Um especial agradecimento aos meus orientadores, Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos e Professor Doutor Luciana Paiva das Neves, por todo o apoio, partilha de conhecimento e tempo despendido.

Um agradecimento à Administração dos Portos da Região Autónoma da Madeira, em especial às Engenheiras Cecília Correia e Ana Gouveia, ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em especial ao Engenheiro Francisco Sancho, ao Instituto Hidrográfico, em especial à Engenheira Ana Nobre e por último mas não menos importante, à Direção Regional Do Ambiente e das Alterações Climáticas da Região Autónoma da Madeira, em especial ao Diretor Regional Dr. Manuel Oliveira, pela disponibilidade e por toda a informação fornecida.

Um forte agradecimento à Mani e ao Maurício pelo carinho, disponibilidade e empenho em contribuir para a aquisição de informação necessária.

Ao Martin e ao João, por partilharem conhecimentos técnicos e por sempre acreditarem em mim. Ao Neal, ao Nacho, ao JC e ao Luci, por sempre me apoiarem e contribuírem para o meu desenvolvimento. Ao Válter, ao André e ao Hugo, por partilharem informações importantes. Ao Rafa, ao Mike e ao Isco por sempre me motivarem e acreditarem em mim.

Um agradecimento incondicional à minha família e amigos, por me apoiarem durante todo o percurso, acreditando sempre em mim. À Pitucha, à Naty, à Lúcia, à Regi, ao Uvinha e às Marias por todo o apoio e carinho. À minha mãe, por tudo.

Por fim, a mim, por superar mais uma etapa.

RESUMO

A exposição ao ambiente marinho e o crescente desenvolvimento do litoral têm tornado as zonas costeiras mais vulneráveis a riscos, como a erosão e os galgamentos, que se espera virem a agravar-se devido aos efeitos provocados pelas alterações climáticas. Estes efeitos passam pelo aumento do nível médio da água do mar e uma maior frequência e intensidade de eventos extremos, que contribuem para o recuo da linha de costa afetando assim populações e ecossistemas costeiros.

A Praia Formosa, situada na costa sul da Ilha da Madeira, é cada vez mais afetada por galgamentos, erosão e variação da linha de costa. Deste modo, torna-se importante estudar a evolução desta praia, avaliar os riscos costeiros e analisar estratégias de adaptação que se adequem ao local.

Devido ao elevado valor económico e social da Praia Formosa, torna-se relevante adotar medidas e definir estratégias que reduzam a sua vulnerabilidade. Tais alternativas podem passar pela alimentação artificial da praia com areia, reperfilamento da estrutura longitudinal aderente ou construção de estruturas longitudinais destacadas submersas. Para o estudo de concessão das alternativas, é importante ter em consideração a evolução da praia, considerando a evolução histórica e possíveis cenários futuros.

Esta dissertação teve como objetivo analisar o risco de galgamento costeiro na Praia Formosa, com o auxílio da modelação numérica, e assim comparar as possíveis alternativas de redução dos galgamentos. Inicialmente foi analisada a adaptação aos riscos costeiros, seguida de uma caraterização da Praia Formosa, onde se recorreu à ferramenta *CoastSat* para observar a evolução da linha de costa. Posteriormente foi realizada uma avaliação preliminar da obra longitudinal aderente (vulgo paredão) utilizando as fórmulas semi-empíricas do manual EurOtop e da rede neuronal *XGB-Overtopping*. Por fim, foi aplicado o modelo numérico *XBeach*, com recurso ao *Delft3D*, de forma a analisar, avaliar e definir alternativas que reduzam os eventuais galgamentos costeiros, comparativamente aos que são observados atualmente, na praia Formosa. A alimentação artificial da praia com areia e a implementação de uma barra submersa demonstraram ser duas alternativas promissoras ao nível da redução de galgamentos. Um estudo mais aprofundado será para otimizar a sua conceção e reduzir eventuais efeitos negativos.

Deste estudo, foi possível concluir que a Praia Formosa é cada vez mais vulnerável a condições de agitação marítima extremas, aumentando assim o risco de erosão, galgamentos costeiros e inundações. Apesar de existir no local um paredão com crista refletora integrado no passeio marítimo, em dias de tempestade, esta estrutura de proteção é insuficiente para prevenir riscos associados à inundação. O expectável aumento do nível do mar tenderá certamente a agravar esses riscos.

PALAVRAS-CHAVE: Galgamento Costeiro, Ilha da Madeira, Alterações Climáticas, Modelação Numérica, Estratégias de Adaptação

ABSTRACT

The exposure to the marine environment and the increasing development have made coastal zones more vulnerable to risks such as erosion and overtopping, which are expected to worsen due to the effects of the climate change. These effects include an increase in the mean sea water level and a greater frequency and intensity of extreme events, which contribute to the retreat of the coastline, thus affecting coastal populations and ecosystems.

Praia Formosa is a beach located on the south coast of Madeira Island, in an area increasingly affected by overtopping, erosion, and shoreline variation. Thus, it becomes important to study the evolution of this beach, to evaluate coastal risks and to analyse strategies to suit the site.

Due to the high economic and social value of Praia Formosa, it becomes relevant to adopt new measures and define strategies that reduces its vulnerability. Such alternatives may involve artificial nourishment, the renovation of the exixting vertical wall or the construction of submerged detached longitudinal structures. For the study of these alternatives, it is important to take into account the evolution of the beach, considering the historic evolution and possible future scenarios.

This dissertation aimed at analysing coastal overtopping risks in Praia Formosa, and comparing possible alternatives to reduce them, using numerical modelling. Firstly, present coastal risks were assessed, followed by a characterization of Praia Formosa, where the evolution of the historical coastline was analysed by using the CoastSat tool. Subsequently, a preliminary design was performed, by using semi-empirical formulation described in the EurOtop manual and the XGB-Overtopping neural network. Case study examples of coastal protection structures similar to the ones that can be proposed to Praia Formosa are provided, for reference. Finally, the numerical model XBeach, with support of Delft3D, was applied to analyse, evaluate and compare possible alternatives to reduce the coastal overtopping, with respect to present day overtopping. The considered artificial sand nourishment and implementation of a submerged breakwater are two promising alternatives to reduce wave overtopping. A more in-depth study will be needed to optimize their design and reduce possible negative effects.

Based on the current study it was possible to conclude that Praia Formosa is increasingly vulnerable to extreme sea conditions, thus increasing the risk of erosion, coastal overtopping and flooding. Although the beach has a reflecting vertical wall integrated in the promenade as a protective structure, on stormy days it is not sufficient to prevent coastal risks associated to inundations. The expected sea level rise will certainly tend to exacerbate these risks.

KEYWORDS: Wave Overtopping, Madeira Island, Climate Change, Numerical Modelling, Adaptation Strategies

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i
RESUMO iii
ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. INTRODUÇÃO 1
1.2. OBJETIVOS 2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 2

2. AVALIAÇÃO E ADAPTAÇÃO DE RISCOS COSTEIROS 4
2.1. ZONAS COSTEIRAS 4
2.2. RISCOS COSTEIROS 5
2.2.1. PERIGO 5
2.2.2. EXPOSIÇÃO 6
2.2.3. VULNERABILIDADE 6
2.3. GALGAMENTOS COSTEIROS 6
2.3.1. FATORES CONDICIONANTES 8
2.3.1.1. Agitação Marítima 8
2.3.1.2. Nível de Água 9
2.3.1.3. Estrutura Costeira 9
2.4. ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS 10
2.5. GESTÃO DE RISCOS COSTEIROS E ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO 11
2.5.1. PROTEÇÃO 11
2.5.1.1. Alimentação Artificial 11
2.5.1.2. Estruturas Longitudinais Aderentes 12
2.5.1.3. Estruturas Longitudinais Destacadas 13
2.5.2. AVANÇO 13
2.5.3. ACOMODAÇÃO 13
2.5.4. RELOCALIZAÇÃO 14
2.6. CASOS DE GALGAMENTOS COSTEIROS 14
2.6.1. PORTUGAL 14

2.6.1.1. Furadouro 14
2.6.1.2. Praia da Cova Gala, Figueira da Foz 15
2.6.2. INTERNACIONAIS 16
2.6.2.1. Gâvres, Bretanha, França 16
2.6.2.2. Praia de Waikiki, Havai 17
2.6.3. SÍNTESE CONCLUSIVA 18

3. CARATERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO 19
3.1. PRAIA FORMOSA 19
3.2. ANÁLISE TEMPORAL 20
3.2.1. RELATOS DE ACONTECIMENTOS 21
3.3. DINÂMICA SEDIMENTAR 23
3.4. CONDIÇÕES MARÍTIMAS 23
3.5. EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA 25
3.6. ESTUDOS ANTERIORES 29
3.6.1. ESTUDO DE ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL 29
3.6.2. ESTUDO DE ARRANJO PAISAGÍSTICO DA MARGINAL E DO ACESSO À PRAIA 31
3.6.3. SÍNTESE CONCLUSIVA 32

4. CONCEÇÃO PRELIMINAR DE ALTERNATIVAS 33
4.1. CONCEÇÃO PRELIMINAR 33
4.2. FÓRMULAS SEMI-EMPÍRICAS 34
4.2.1. *INPUTS* 34
4.2.2. ESTRUTURA VERTICAL ADERENTE 36
4.2.3. DIQUE COM BASE EMERGENTE 36
4.2.4. ANÁLISE ENTRE ESTRUTURAS 36
4.3. *XGB-OVERTOPPING* 37
4.4. SÍNTESE CONCLUSIVA 38

5. ESTUDO NUMÉRICO 39
5.1. MODELO NUMÉRICO 39
5.2. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO 41
5.2.1. DADOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO 41

5.2.2. *INPUTS* 42
5.2.2.1. Grelha e Batimetria 42
5.2.2.2. Ficheiros de Texto 43
5.2.3. *OUTPUTS* 43
5.3. CONDIÇÕES DE TESTE 44
5.4. ANÁLISE DE RESULTADOS 46
5.4.1. SIMULAÇÃO 1 46
5.4.2. SIMULAÇÃO 2 48
5.4.3. SIMULAÇÃO 3 51
5.4.4. ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL 54
5.4.5. SIMULAÇÃO 4 55
5.4.6. SIMULAÇÃO 5 60
5.4.7. SIMULAÇÃO 6 64
5.4.8. ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS 69
5.4.8.1. Galgamentos Costeiros 69
5.4.8.2. Simulações 70
5.5. PROPOSTA DE ALTERNATIVAS 70
5.5.1. ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL 70
5.5.2. ESTRUTURAS LONGITUDINAIS ADERENTES 71
5.5.3. ESTRUTURAS LONGITUDINAIS DESTACADAS 71

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 72
6.1. CONCLUSÕES 72
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 73

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 75

ANEXO A 78
ANEXO B 79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Galgamento costeiro. 6

Figura 2.2 - Caudais críticos de galgamento como níveis de segurança [adaptado de 14]..... 7

Figura 2.3 - Exemplo de uma estrutura de proteção de galgamentos costeiros. 10

Figura 2.4 - Praia do Furadouro [22]. 15

Figura 2.5 - Danos provocados por um evento extremo na Praia da Cova de Gala [27]..... 16

Figura 2.6 - Praia de Gâvres, Bretanha, França [4, 28]. 17

Figura 2.7 - Galgamentos ocorridos na Praia de Waikiki: A - Praia Fort DeRussy; B - Praia Halekūlani; C - Praia Royal Hawaiian [adaptado de 30]..... 17

Figura 3.1 - Vista panorâmica e localização da Praia Formosa na ilha da Madeira. 19

Figura 3.2 - Vista leste da Praia Formosa entre 1934 e 1939 (esquerda); boqueirão e limite leste da Praia Formosa em 2014 (direita) [32]..... 20

Figura 3.3 - Vista da Praia Formosa e das construções marginais existentes em 2021. 21

Figura 3.4 - Agitação marítima e danos causados pela mesma, em fevereiro de 2022 [33, 34]. .21

Figura 3.5 – Localização da boia-ondógrafo do Funchal 23

Figura 3.6 - Variação anual da altura de onda significativa média e máxima. 24

Figura 3.7 - Direções de propagação das ondas distribuídas por classes de altura de onda significativa obtidas pela boia do Funchal entre 1997 e 2021. 24

Figura 3.8 - Frequência dos períodos médios obtidos pela boia do Funchal entre 1997 e 2021. 25

Figura 3.9 - Passos do processamento da informação do CoastSat [36]. 25

Figura 3.10 - Distribuição dos 11 transectos pela Praia Formosa. 26

Figura 3.11 - Esquema usado para o cálculo das coordenadas. 26

Figura 3.12 - Esquema usado para o cálculo variação da linha de costa. 27

Figura 3.13 - Limites das taxas de recuo e avanço da linha de costa, em m/ano, e respetiva classificação. 28

Figura 3.14 – Variação da linha da costa em relação à linha de referência, nos primeiros 3 transectos. 28

Figura 3.15 - Variação da linha da costa em relação à linha de referência, nos transectos 4 a 7. 29

Figura 3.16 - Variação da linha da costa em relação à linha de referência, nos últimos 4 transectos. 29

Figura 3.17 - Perfil da praia segundo as alternativas apresentadas [31]. 30

Figura 3.18 - Perfil das alternativas A e B, afetadas por condições extremas de agitação marítima [31]. 31

Figura 3.19 - Proposta de intervenção [37]. 32

Figura 4.1 – Esboço de um paredão (esquerda) e de um dique (direita).....34

Figura 4.2 – Variáveis utilizadas pelo XGB-Overtopping para esquematização das estruturas [38] 37

Figura 5.1 – Ficheiros de *input*.....42

Figura 5.2 - Grelha e batimetria obtidas pelo *Delft3D*.....43

Figura 5.3 – Esboço da alimentação artificial (esquerda) e da barra submersa (direita).....45

Figura 5.4 – Disposição das sondas ao longo da linha de costa. 45

Figura 5.5 - Gráficos das alturas de onda em distintos momentos da tempestade de 5 de dezembro de 2010.....46

Figura 5.6 – Caudais de galgamento observados durante a tempestade de 5 de dezembro de 2010, para cada sonda.....46

Figura 5.7 - Gráficos da evolução da cota de fundo durante a tempestade de 5 de dezembro de 2010.....47

Figura 5.8 - Movimento sedimentar durante a tempestade de 5 de dezembro de 2010.....48

Figura 5.9 - Gráficos das alturas de onda em distintos momentos da tempestade de 5 de março de 2013.....49

Figura 5.10 – Caudais de galgamento observados durante a tempestade de 5 de março de 2013, para cada sonda.....49

Figura 5.11 - Gráficos da evolução da cota de fundo durante a tempestade de 5 de março de 2013.....50

Figura 5.12 - Movimento sedimentar durante a tempestade de 5 de março de 2013.....51

Figura 5.13 - Gráficos das alturas de onda em distintos momentos da tempestade de 28 de fevereiro de 2018.....52

Figura 5.14 – Caudais de galgamento observados durante a tempestade de 28 de fevereiro de 2018, para cada sonda.....52

Figura 5.15 - Gráficos da evolução da cota de fundo durante a tempestade de 28 de fevereiro de 2018.....53

Figura 5.16 - Movimento sedimentar durante a tempestade de 28 de fevereiro de 2018.....54

Figura 5.17 - Gráficos das alturas de onda em distintos momentos da tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e a subida de 0.5 m do nível do mar (direita).....56

Figura 5.18 – Caudais de galgamento observados durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração a subida de 0.5 m do nível do mar.....57

Figura 5.19 - Gráficos da evolução da cota de fundo durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e a subida de 0.5 m do nível do mar (direita). 58

Figura 5.20 - Movimento sedimentar durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e a subida de 0.5 m do nível do mar (direita). 59

Figura 5.21 - Gráficos das alturas de onda em distintos momentos da tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e condições de alimentação artificial (direita). 60

Figura 5.22 – Caudais de galgamento observados durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração a alimentação artificial da praia. 61

Figura 5.23 - Gráficos da evolução da cota de fundo durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e condições de alimentação artificial (direita). 62

Figura 5.24 - Movimento sedimentar durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e condições de alimentação artificial (direita). 63

Figura 5.25 - Gráficos das alturas de onda em distintos momentos da tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e com a barra submersa (direita) 65

Figura 5.26 – Caudais de galgamento observados durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração implementação da barra submersa. 66

Figura 5.27 - Gráficos da evolução da cota de fundo durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e com a barra submersa (direita). 67

Figura 5.28 - Movimento sedimentar durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e com a barra submersa (direita). 68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais causas dos riscos costeiros [adaptado de 4].....5

Tabela 2.2 - Tipos de rebentação. 9

Tabela 3.1 - Variação do recuo médio ao longo dos anos [adaptado de 32]. 21

Tabela 3.2 - Algumas ocorrências relacionadas com galgamentos costeiros 22

Tabela 3.3 - Tendência da evolução da linha de costa para cada transecto e respetiva classificação 28

Tabela 4.1 - Classificação do caudal de galgamento médio [adaptado de 13]. 34

Tabela 4.2 - Inputs, parâmetros e fatores utilizados nas fórmulas semi-empíricas. 35

Tabela 4.3 - Resultados do caudal de galgamento costeiro para uma estrutura do tipo paredão 36

Tabela 4.4 - Resultados do caudal de galgamento costeiro para uma estrutura do tipo dique com base emergente.....36

Tabela 4.5 - Variáveis de input utilizadas no XBG-Overtopping. 37

Tabela 5.1 - Condições de onda e maré analisadas para cada simulação.....44

Tabela 5.2 – Galgamento máximo obtido em cada sonda, para cada simulação de tempestade nas condições atuais. 55

Tabela 5.3 – Galgamento máximo obtido em cada sonda, para cada simulação.....69

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

SÍMBOLOS E LETRAS GREGAS

A_c	Distância entre a berma de coroamento da estrutura e o nível médio do mar [m]
B_r	Extensão horizontal do *bullnose* [m]
C	Celeridade da onda [m/s]
d	Profundidade da água [m]
E	Energia da onda [Nm/m^2]
g	Aceleração gravítica [m/s^2]
G_c	Largura da berma de coroamento da estrutura [m]
g_b	Berma
g_β	Obliquidade da onda
g_f	Rugosidade
g_n	Parede no fim do declive suave
H	Altura de onda [m]
H_{mo}	Altura de onda significativa da base da estrutura [m]
h_r	Altura do *bullnose* [m]
h	Profundidade de água à frente da estrutura [m]
h_t	Profundidade de água na base da estrutura [m]
L	Comprimento de onda [m]
$L_{m-1,0}$	Comprimento de onda em águas profundas [m]
q	Caudal de galgamento médio [l/m/s]
R_c	Distância entre a altura de coroamento e o nível médio da superfície livre da água [m]
s	Declividade
$s_{m-1,0}$	Inclinação de onda fictícia
sedero	sedimentação/erosão cumulativa
sigm	frequência média [s^{-1}]
T	Período de onda [s]
$T_{m-1,0}$	Período espectral [s]
T_p	Período de pico [s]
thetamean	Ângulo médio da onda [°]
u	Velocidade Eulerian (componente x) [m/s]
v	Velocidade Eulerian (componente y) [m/s]

$x_{m-1,0}$	Parâmetro de rebentação baseado no $s_{m-1,0}$
zb	Nível do fundo [m]
zs	Nível da água [m]
zs0	Nível da água apenas devido à maré [m]
α	Inclinação do talude [°]
β	Ângulo de ataque de onda [°]
β_r	Ângulo do *bullnose* [°]
γ	Coeficiente de rugosidade
ξ	Número de *Iribarren*

ACRÓNIMOS

APRAM	Administração dos Portos da Região Autónoma da Madeira
DRAAC	Direção Regional do Ambiente e Alterações Climáticas
EPSG	*European Petroleum Survey Group*
IH	Instituto Hidrográfico
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
RAM	Região Autónoma da Madeira
WGS84	*World Geodetic System* 1984

ABREVIATURAS

cot	Cotangente
E1C1	Estrutura atual com condições atuais
E1C2	Estrutura atual com subida do nível médio do mar
E2C1	Estrutura que seria adequada às condições atuais
LITPACK	*Littoral Processes and Coastline Kinetics*
N	Norte
NMM	Nível Médio do Mar
NW	Noroeste
Ref	Referência
S1	Cenário atual de condições extremas
S2	Supressão da berma de coroamento
S3	Redução da distância entre a berma de coroamento e do nível médio do mar
S4	Combinação do S2 e S3
SE	Sudeste

sen	Seno
SW	Sudoeste
tan	Tangente
W	Oeste

1
INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

As zonas costeiras são cada vez mais habitadas devido ao seu elevado potencial. São compostas por sistemas naturais e antropogénicos que possibilitam uma grande variedade de interações e constante desenvolvimento [1]. Contudo, o aumento da procura destas zonas tem vindo a condicioná-las a nível ambiental e assim, trazendo consequências para a humanidade que habita ao seu redor.

A erosão, os galgamentos costeiros e inundações são exemplos de consequências causadas maioritariamente devido a riscos hidrometeorológicos que podem estar a associados a eventos puramente naturais ou mesmo com causa humana [2, 3]. Deste modo, torna-se relevante analisar as influências que as ações naturais e especialmente humanas têm nos potenciais riscos costeiros, de forma a minimizá-los e a provocar uma adaptação eficaz.

Os riscos costeiros são definidos como a relação entre o perigo, a exposição e a vulnerabilidade. Estão relacionados com os danos ou perdas numa determinada área e num determinado período e podem ser potencializados pela ocorrência de eventos extremos, como tempestades e secas, ou mesmo de construções e do próprio desenvolvimento humano na zona costeira [4].

Os galgamentos costeiros potencializam os riscos costeiros. Correspondem a um volume de água que transpõe a zona costeira que é local de construções e atividades antropogénicas, sendo assim um transmissor de energia [5]. Estão relacionados com as condições da agitação marítima, com o nível da água e com a própria estrutura de proteção que a zona costeira possa ter, podendo causar tanto danos ligeiros como fortes [6, 7].

As alterações climáticas, por sua vez, veem intensificar estes fenómenos. Levam principalmente ao aumento do nível do mar, à variação do regime da agitação marítima, a mudanças meteorológicas não habituais e ao aumento da frequência e intensidade de eventos extremos [8]. Desse modo, as alterações climáticas potencializam o aumento da erosão e dos galgamentos costeiros.

Assim sendo, torna-se importante adotar medidas e estratégias de adaptação que limitem as consequências que os riscos costeiros têm vindo a trazer. Estas estratégias podem ser de avanço, de acomodação, de relocalização ou de proteção, sendo esta última através da alimentação artificial das praias, construção artificial de dunas, da construção de estruturas de proteção costeira como esporões, quebramares e proteções longitudinais.

Tanto a nível nacional como internacional, muitas zonas costeiras têm sido alvo de estudo de forma a minimizar os galgamentos costeiros que têm vindo a ser cada vez mais frequentes. Um exemplo disso é a Praia Formosa, situada na ilha da Madeira, Portugal. Trata-se de uma praia com elevado potencial

antropogénico e que tem vindo a ser afetada tanto por galgamentos costeiros como por erosão, mesmo tendo na sua constituição uma estrutura longitudinal aderente de muro vertical.

De forma a determinar os problemas associados e definir possíveis alternativas podem ser realizados diversos estudos. Há estudos preliminares como fórmulas semi-empíricas, que possibilitam a análise de galgamentos a estruturas de proteção costeira, e como a rede neuronal *XBG-Overtopping*, que estima o caudal do galgamento costeiro para uma maior gama de geometrias de estruturas. No entanto, é importante realizar um estudo posterior, melhor fundamentando e com maior precisão, como é o caso dos estudos numéricos.

O modelo numérico *XBeach* simula processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos nos diferentes tipos de costa. Através deste modelo é possível obter uma avaliação com maior fiabilidade e assim, avaliar com maior precisão e facilidade os problemas em causa, possibilitando a comparação de alternativas.

1.2. OBJETIVOS

Esta dissertação teve como objetivos analisar e avaliar os riscos costeiros causados por galgamentos costeiros na Praia Formosa, de forma a estudar estratégias de adaptação que diminuam o risco associado a estes fenómenos, que se esperam vir a tornar-se mais frequentes e intensos devido aos efeitos das alterações climáticas.

Neste estudo foi utilizada a ferramenta *CoastSat* para o estudo da evolução da linha de costa com base em imagens de satélite, as fórmulas semi-empíricas e uma rede neuronal para avaliação dos galgamentos costeiros, e o modelo numérico *XBeach* para avaliação da morfologia costeira e dos galgamentos na Praia Formosa. O estudo considerou a situação de referência (situação atual) e alternativas de proteção.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é constituída por 6 capítulos.

O primeiro capítulo introdutório, divide-se em 3 subcapítulos, introdução ao tema, objetivos e estrutura da dissertação.

O segundo capítulo refere-se à avaliação e adaptação de riscos costeiros. Este capítulo sumaria alguns fundamentos teóricos sobre riscos costeiros com enfâse nos galgamentos costeiros e nas alterações climáticas. Designadamente, é feita uma revisão bibliográfica sobre estratégias de adaptação com enfâse nos sistemas de proteção costeira e, por fim, são analisados alguns casos de estudo nacionais e internacionais.

No terceiro capítulo é feita a caraterização do caso de estudo. Esta caraterização compreende uma descrição geral da Praia Formosa e uma análise das caraterísticas ambientais (dinâmica sedimentar, condições de agitação marítima, evolução da linha de costa, entre outros), bem como uma análise de estudos anteriores.

O quarto capítulo compreende a conceção de alternativas e a sua avaliação preliminar com base em fórmulas semi-empíricas e na rede neuronal *XGB-Overtopping*.

No quinto capítulo é realizado o estudo numérico através do modelo numérico *XBeach*, com recurso ao *Delft3D*, de forma a obter resultados sobre as condições da praia e assim, possibilitar desenvolver propostas de alternativas que reduzam os impactos atuais dos galgamentos costeiros provocam na Praia Formosa.

Finalmente, o sexto capítulo engloba as conclusões da dissertação e são propostos possíveis desenvolvimentos futuros.

2
AVALIAÇÃO E ADAPTAÇÃO DE RISCOS COSTEIROS

2.1. ZONAS COSTEIRAS

A zona costeira é composta por duas componentes que se relacionam entre si, os sistemas naturais e os sistemas antropogénicos. Os sistemas naturais incluem vários ecossistemas, possibilitando interações não só biológicas, geológicas, físicas e químicas, mas também oceanográficas e meteorológicas [1].

Por outro lado, os sistemas antropogénicos incluem as infraestruturas construídas junto à costa, desde portos a hotéis e transportes terrestres; as atividades antropogénicas como pesca, turismo e desporto; as barragens, extração de areia nos rios, estuários, poluição das águas e desflorestação, que apesar de não terem origem na zona costeira, vêm a afetar a mesma; e por fim, o ordenamento do território e gestão da zona costeira [9]. Ambas as componentes afetam a dinâmica das zonas costeiras, sendo que, em Portugal, as ações antropogénicas têm uma elevada preponderância, condicionando muito frequentemente a dinâmica natural dos ambientes costeiros em geral e das praias em particular.

As praias são constituídas por sedimentos não consolidados acumulados, como é o caso da areia ou por fragmentos rochosos, como por exemplo, o calhau rolado. Numa costa arenosa baixa, a linha de costa sofre períodos de erosão e de acreção que variam espacialmente e temporalmente (ao longo de um dia, ao longo de um ano, décadas, milénios, entre outros) de acordo com diversos fatores, tais como as marés, o clima de agitação e o transporte sedimentar. Numa costa rochosa há instabilidade devido a diversos fatores, como a erosão costeira, que podem provocar desabamentos. Esses desabamentos acabam por contribuir para o fornecimento de sedimentos a outras praias, favorecendo a preservação de costas arenosas [8].

A morfologia das praias e a evolução da linha de costa são também afetadas por ações antropogénicas que, muito frequentemente, tendem a agravar as consequências da erosão e dos galgamentos em zonas costeiras. Especificamente, as obras de proteção e de defesa costeiras apesar de protegerem um trecho interior com elevado interesse humano, afetam a dinâmica natural das zonas costeiras e os sistemas de defesa naturais (como os sistemas dunares) e podem acelerar erosões a sotamar, afetando negativamente os ecossistemas costeiros [8]. Por outro lado, com obras de proteção e de defesa costeiras a perceção de risco tende a reforçar a exposição ao menos, verificando-se não o abandono de zonas vulneráveis mas a persistência em construir e desenvolver atividades nessas mesmas zonas.

Deste modo, é importante conhecer e analisar a influência das interações entre ações naturais e antropogénicas, de forma a gerir e a minimizar os riscos costeiros potenciais.

2.2. RISCOS COSTEIROS

Aos riscos costeiros de galgamento estão associados danos ou perdas, causados em áreas vulneráveis durante um determinado período de tempo e com uma frequência associada. Estes danos e perdas podem ser físicos, económicos, culturais ou ambientais e podem ser intensificados pela ocorrência de acontecimentos extremos e pelo desenvolvimento de construções na zona costeira [2, 10].

Um risco costeiro pode ser definido como o produto entre o perigo, a exposição e a vulnerabilidade, combinando assim a probabilidade da ocorrência de um certo acontecimento com a gravidade das suas consequências [3, 4].

Assim sendo, deve ser avaliada a probabilidade de ocorrência de qualquer tipo de perigo e as possíveis consequências associadas, tendo em consideração a vulnerabilidade e a exposição ao risco. Desta forma, é possível gerir os potenciais riscos costeiros da zona em questão, através de um planeamento e ordenamento do território adequado. Isto é de elevada importância, pois vai possibilitar uma adequada utilização de recursos, deveras necessária para o desenvolvimento e bem-estar das gerações futuras.

2.2.1. PERIGO

O perigo trata-se de um evento natural ou antropogénico, podendo resultar da combinação destes dois fatores. Na Tabela 2.1 são apresentadas algumas causas e consequências associadas principalmente a riscos hidrometeorológicos.

Tabela 2.1 – Principais causas dos riscos costeiros [adaptado de 2]

Acontecimento	Origem	Consequência
Erosão Costeira	Vento e ondulação forte Marés intensas Tempestades	Dano a infraestruturas Recuo da linha de costa
Inundações Costeiras	Rios e Ribeiras Marés Tempestades	Rutura/superação dos meios de proteção
Variação do nível médio da água do mar	Atividade humana	Inundações e galgamentos Erosão costeira Variação da linha de costa

As principais causas dos galgamentos costeiros estão associadas a condições de tempestade cada vez mais reforçadas pelas alterações climáticas, incluindo as alterações do nível médio da água do mar. Por outro lado, a construção e atividade humana no litoral, leva a que haja um aumento do risco por aumento da exposição e vulnerabilidade.

No caso de galgamentos costeiros, os perigos podem resultar em perdas de vidas humanas e feridos. Podem causar danos diretos como perdas materiais, afetar propriedades, edifícios e terrenos agrícolas, ou danos indiretos como disrupção de atividades económicas por períodos de tempo mais ou menos alargados, que resultam em perdas económicas [5].

2.2.2. EXPOSIÇÃO

A exposição ocorre quando pessoas ou bens ocupam áreas vulneráveis a perigos costeiros, podendo sofrer impactos a curto ou a longo prazo. Deste modo, o risco aumenta com o aumento de pessoas e bens expostos e, portanto, com o desenvolvimento de infraestruturas e atividades económicas junto à linha da costa e com a urbanização no litoral.

Quando já existe uma exposição elevada, a situação deve ser analisada de forma a serem tomadas medidas de prevenção e segurança, de forma a diminuir o impacto dessa exposição e, ao mesmo tempo, deve ser evitado o reforço dessa exposição para o futuro. Para isso, deve ser feita uma análise adequada antes, durante e após o desenvolvimento urbano do litoral, considerando sempre os potenciais riscos na área em questão e em áreas circundantes [2].

2.2.3. VULNERABILIDADE

A vulnerabilidade pode ser considerada como a sensibilidade e a suscetibilidade a fatores biofísicos, económico-sociais e ambientais que podem gerar riscos [11].

Considera-se que uma determinada zona é mais vulnerável quando não existem recursos que evitem os perigos com potencial para gerar danos ou quando a recuperação após a existência de danos ou perdas é difícil.

A vulnerabilidade das zonas costeiras pressupõe que estas possam ser diretamente afetadas por perigos, por exemplo galgamentos costeiros ou erosão, capazes de originar alterações hidromorfológicas ou/e condições hidrodinâmicas que possam resultar em danos e perdas nos usos ou/e atividades expostas.

2.3. GALGAMENTOS COSTEIROS

O galgamento costeiro, como exemplificado na Figura 2.1, corresponde a um volume de água que transpõe a altura de coroamento da estrutura de proteção marítima num intervalo de tempo e espaço aleatório, devido à ação das ondas e marés [5]. Normalmente é expresso através do caudal médio por metro linear da estrutura e ocorre quando o espraiamento ultrapassa a cota de coroamento de uma estrutura, estando diretamente relacionado com a agitação marítima local, o nível médio do mar e a sua geometria [6, 7].

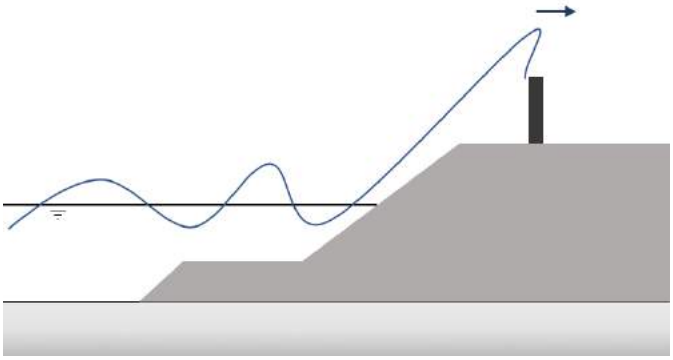


Figura 2.1 - Galgamento costeiro.

Deste modo, o galgamento é considerado um fenómeno de transmissão de energia, onde a onda que incide é dissipada pela rebentação e a energia cinética excedente transforma-se em energia potencial, pelo escoamento que ocorre na estrutura [12].

Os galgamentos podem ser classificados como *green water*, quando a estrutura é transposta por uma massa de água relativamente coerente, estando este fenómeno relacionado principalmente com a ondulação. Por outro lado, podem ser classificados como *spray*, fenómeno que ocorre quando os galgamentos não são contínuos, gerando borrifos causados pela ação do vento. Este último fenómeno, embora possa não ter elevada significância no volume do galgamento, pode causar perigo devido à redução de visibilidade, a danos na vegetação e à deterioração de construções devido à salinidade [13].

Por outro lado, os galgamentos podem ser classificados segundo a sua intensidade, como galgamentos ligeiros, quando não há danos estruturais diretos, apenas uma ligeira inundação com ligeiros danos ou inconveniências associadas; galgamentos moderados, quando há ligeiro ou inexistente dano estrutural direto na estrutura, mas provoca danos moderados devido à inundação; e galgamentos fortes, que podem manter uma estrutura de defesa bem projetada sem danos, no entanto, danificam estruturas de menores dimensões e não tão bem concebidas [5].

Os galgamentos costeiros afetam significativamente o desenvolvimento humano através, por exemplo, de prejuízos materiais e, alterações paisagísticas e sedimentares, podendo também afetar aspetos de saúde pública e de segurança pessoal, daí ser de elevada importância gerir o risco associado a este fenómeno, limitando as suas consequências ou/e reduzindo o perigo através de estruturas de proteção.

Através de vários estudos realizados ao longo dos anos, tornou-se possível representar valores críticos do caudal de galgamento e relacioná-los com a segurança associada aos mesmos, como mostra a Figura 2.2. No entanto, trata-se apenas de uma base de referência obtida através de modelos físicos, a qual não é possível definir níveis exatos de segurança devido à elevada complexidade e variância do fenómeno em questão e condições associadas.



Figura 2.2 – Caudais críticos de galgamento como níveis de segurança [adaptado de 14].

Espera-se que os galgamentos venham a aumentar a sua frequência e a agravar-se cada vez mais. Tal acontecimento deve-se à combinação de diversos fatores, tendo as alterações climáticas um elevado peso no desenvolvimento deste fenómeno e por sua vez, nas consequências associadas.

2.3.1. Fatores Condicionantes

2.3.1.1. Agitação Marítima

A agitação marítima é considerada o principal fator condicionante de um galgamento, sendo dependente pelas caraterísticas de onda, como altura de onda, o período e a direção de propagação, e pelos próprios fenómenos de propagação [12, 15].

A altura de onda relaciona-se com o comprimento de onda através da declividade. Por sua vez, o comprimento de onda também se relaciona com o período de onda através da relação de dispersão e da celeridade. Estas relações encontram-se nas Equações 1, 2 e 3, respetivamente.

$$s = \frac{H}{L} \tag{1}$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi}\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \tag{2}$$

$$C = \frac{L}{T} \tag{3}$$

Sendo s a declividade da onda, H a altura de onda, L o comprimento de onda, T o período, g a aceleração gravítica, d a profundidade de água e C a celeridade. Ao aproximar-se da costa, a profundidade de água diminui, logo a declividade e a altura de onda aumentam e o comprimento de onda, o período e a velocidade de propagação diminuem.

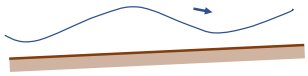
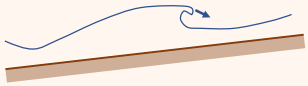
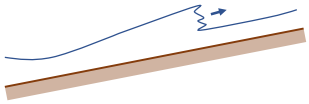
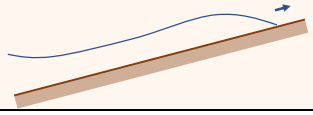
Quando o limite físico da declividade da onda é excedido, ocorre rebentação e a energia da onda pode ser dissipada sobre a estrutura de proteção costeira, causando galgamento. Deste modo, é importante considerar os fenómenos de propagação, como reflexão, refração, espraiamento e a própria rebentação.

Dependendo da batimetria e da altura de onda, a rebentação poderá ocorrer de diferentes formas, como as apresentadas na Tabela 2.2, que são caraterizadas pelo parâmetro de rebentação. Este parâmetro, representado na Equação 4, indica o tipo de rebentação consoante a inclinação do talude ou da praia em questão e a declividade da onda, representa a ação da onda sobre a estrutura, bem como alguns dos seus efeitos.

$$\xi = \frac{tan\alpha}{\sqrt{s}} \tag{4}$$

O ângulo de incidência das ondas corresponde ao ângulo entre a direção de propagação das ondas e a direção perpendicular à estrutura, parâmetro igualmente importante no estudo de galgamentos. Quanto menor for o seu valor, maior será o impacto na rebentação, logo, maior será a massa de água a transpor a estrutura de proteção costeira, ou seja, maior o galgamento [6, 15].

Tabela 2.2 - Tipos de rebentação

Rebentação	Tipo de Rebentação	Parâmetro
	**Progressiva** praias suaves declividade grande	$\xi < 0.4$
	**Mergulhante** praias ligeiramente íngremes	$0.4 < \xi < 2.0$
	**Colapsante** praias íngremes	$\xi \geq 2.0$
	**Oscilante** praias muito íngremes declividade baixa	$2.0 < \xi < 2.3$

2.3.1.2. Nível de Água

O nível médio da água do mar varia com a maré astronómica e a maré meteorológica, tendo as tempestades um elevado peso nas variações devido à sobrelevação do nível da água causada por ventos fortes e variações de pressão.

De uma forma geral, a preia mar é a altura mais crítica para a ocorrência de galgamentos, em especial quando combinada com uma tempestade. Isto deve-se ao facto de o nível de água do mar ser mais elevado nestas alturas. Devido a essa elevação de nível, há uma menor área de talude emerso quando comparado com a baixa-mar, logo haverá uma menor dissipação de energia ao longo do talude. Desse modo, haverá uma maior probabilidade de ocorrência de galgamentos, tendo em conta que a energia da onda acabará por se dissipar sobre a estrutura costeira ou próximo dela.

2.3.1.3. Estrutura Costeira

A geometria da estrutura de proteção costeira tem uma elevada influência na ocorrência de galgamentos. Através da variação dos seus parâmetros é possível reduzir ou limitar completamente a quantidade de água que transpõe o coroamento da estrutura, reduzindo assim a probabilidade de ocorrência de galgamentos sobre uma determinada estrutura.

Esses parâmetros incluem a distância vertical entre a cota do coroamento da estrutura e a cota do nível médio da água, a rugosidade e permeabilidade, a inclinação e configuração do talude e a própria largura do coroamento [12].

Encontra-se na Figura 2.3 uma representação de uma estrutura de proteção a galgamentos costeiros. Quanto maior for a distância entre a altura de coroamento e o nível médio da superfície livre da água, menor será a probabilidade de ocorrência de galgamento, no entanto, maior será o custo associado à construção e manutenção da estrutura.

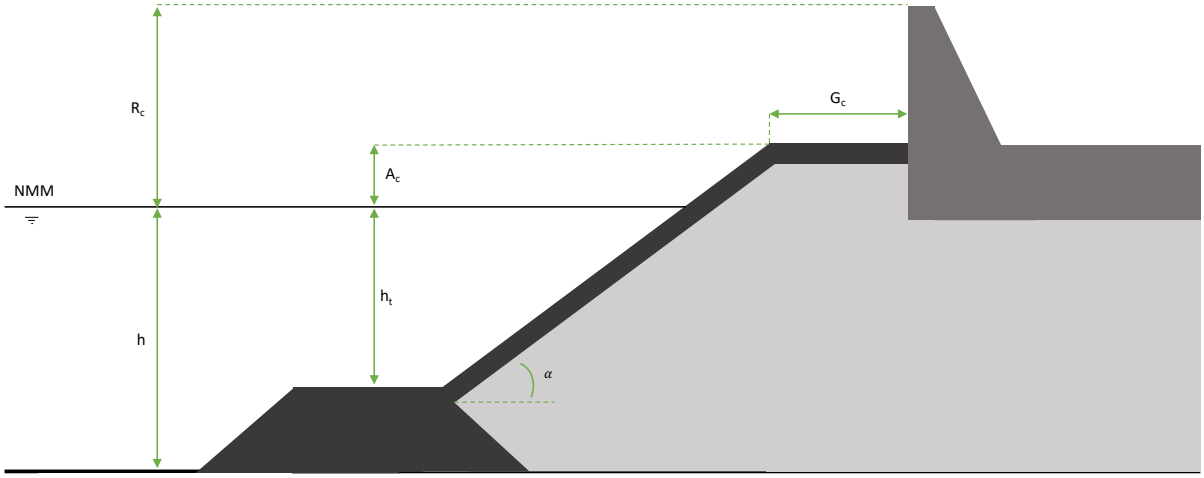


Figura 2.3 - Exemplo de uma estrutura de proteção de galgamentos costeiros.

G_c corresponde à largura da berma de coroamento da estrutura, R_c à distância entre a altura de coroamento e o nível médio da superfície livre da água, h à profundidade de água em frente da estrutura, h_t à profundidade na base da estrutura, A_c à distância entre a berma de coroamento da estrutura e o nível médio do mar e α à inclinação do talude.

O galgamento também é influenciado pelo parâmetro de rebentação que relaciona a inclinação do talude com as caraterísticas da onda. Por outro lado, também é influenciado pelo espraiamento e por sobrelevações do nível do mar que afetam a decisão da cota de coroamento [6].

A estrutura poderá ser vertical ou ainda possuir um defletor curvilíneo de ondas. Este tipo de estrutura é utilizado em zonas de agitação marítima forte, provoca o retorno da onda incidente que gera uma maior dissipação de energia e por sua vez, um menor galgamento [12].

2.4. ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

As alterações climáticas devem-se principalmente a emissões de gases com efeito de estufa que resultam da atividade humana e originam consequências de curto a longo prazo.

No litoral português, os principais impactos causados pelas alterações climáticas correspondem à subida do nível médio do mar, à variação do regime de agitação marítima e a mudanças meteorológicas, como é o caso do aumento da intensidade, frequência e duração de eventos extremos. Estes acontecimentos causam instabilidades no balanço sedimentar e o recuo da linha de costa e atuam através do aumento de erosão e da frequência e intensidade de galgamentos e inundações costeiras [8, 16].

Em Portugal Continental, no século XX, o nível médio do mar subiu cerca de 15 cm. No século atual, tem vindo a subir em média 1,7 mm por ano [1, 17]. É previsto que a temperatura média venha a subir, havendo um aumento das amplitudes térmicas ao longo do dia e do gradiente térmico entre zonas costeiras e zonas montanhosas. São previstas também, ondas de calor mais frequentes, menor frequência de baixas temperaturas e diminuição da precipitação média, mas com eventos extremos de precipitação no inverno [1, 17].

Até ao final do século XXI, é previsto um aumento do nível médio do mar de 50 cm na Região Autónoma da Madeira, além de um aumento da temperatura entre 1,3 e 3ºC, com redução de cerca de 30% de precipitação [17, 18]. Estas mudanças levam a um aumento da vulnerabilidade à erosão e a inundações, especialmente em zonas costeiras de baixas cotas.

O aumento do nível médio da água do mar tenderá a agravar o nível de risco nas zonas costeiras. Deste modo, é previsível um aumento da erosão costeira nos próximos tempos, bem como a ocorrência de galgamentos e inundações, daí ser importante analisar e adotar medidas que reduzam os riscos costeiros.

2.5. GESTÃO DE RISCOS COSTEIROS E ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO

As incertezas associadas aos efeitos das alterações climáticas, nomeadamente a subida do nível médio da água do mar, reforçam a importância de adotar medidas que limitam as consequências dos riscos de erosão, galgamentos e inundações em zonas costeiras.

As estratégias de adaptação costeira dividem-se fundamentalmente em três grupos, proteção, acomodação e relocalização. Recentemente, em alguns países da Dinamarca, uma nova estratégia, o avanço sobre o mar, tem vindo a ser experimentada. Trata-se, no entanto, de uma estratégia cara e, portanto, não exequível em muitos contextos [19]. Dentro de cada estratégia, existe um conjunto de possíveis medidas alternativas que podem ser implementadas isoladamente ou em combinação.

2.5.1. PROTEÇÃO

A estratégia de proteção consiste em manter a linha de costa através de obras de engenharia leve, como a alimentação artificial e a construção de dunas artificiais, bem como construção de estruturas pesadas, como esporões, quebramares e proteções longitudinais. Este tipo de estratégia é a mais utilizada pela maioria dos estados-membros europeus com zonas costeiras [9, 20].

No projeto e construção de estruturas de proteção costeira, é importante realizar uma análise detalhada dos riscos e da sua evolução, bem como estudar o impacto da intervenção na dinâmica natural da zona costeira, por forma a serem selecionadas as medidas de adaptação adequadas. Com isto, será possível minimizar o risco associado, diminuindo, mas não eliminando totalmente, a intensidade do perigo.

2.5.1.1. Alimentação Artificial

A alimentação artificial corresponde ao depósito de sedimentos, como areia, numa determinada praia ou zona costeira. Embora existam exemplos de projetos de alimentação artificial com fins puramente recreacionais, a maior parte dos projetos tem como finalidade a proteção da costa. Este processo deve ser realizado após o inverno, ou seja, após o período de maior agitação, e deve ser monitorizado para avaliar a necessidade de possíveis recargas [16].

Além de proteger a costa da erosão e dos galgamentos costeiros, a alimentação artificial também pode trazer benefícios para as atividades económicas, turísticas e recreativas realizadas no local, através do alargamento da praia, de um possível aumento da biodiversidade e de um impacto visual mais reduzido e natural, quando comparado com a construção de estruturas pesadas [16]. Por outro lado, pode ser benéfica para as praias adjacentes devido a possíveis redistribuições dos sedimentos alimentados, além de poder ser implementada em conjunto com outras estruturas de proteção, para uma maior eficiência sobretudo em zonas mais expostas a condições de agitação marítima mais energéticas.

Essa redistribuição dos sedimentos alimentados pode obrigar a manutenções periódicas e, logo, a reinvestimentos periódicos.

Efetivamente, é frequente as praias alimentadas artificialmente sofrerem ajustes ao perfil de projeto e experimentarem uma taxa de erosão maior do que a verificada antes da alimentação. As principais razões para que isto aconteça relacionam-se com o facto de a alimentação não atuar sobre as causas originais

da erosão (isto é, se houver um défice nas fontes aluvionares este subsiste após a alimentação) e, por outro lado, com o facto de a disponibilidade de sedimentos para suprir a capacidade potencial de transporte aumentar com essa alimentação em comparação com uma praia em erosão e, portanto, desprovida de sedimentos. Também é frequente o perfil da praia alimentada modificar-se significativamente imediatamente após a construção. Este facto relaciona-se com o método construtivo que, por conveniência, envolve normalmente a construção de uma praia mais larga e com um perfil transversal mais íngreme do que o perfil de projeto (que deverá ser mais aproximado ao perfil de equilíbrio). Relativamente ao perfil longitudinal da praia alimentada, deve ser projetado para estar em equilíbrio com as condições habituais de agitação marítima, limitando assim a redistribuição lateral de sedimentos.

A análise dos custos de investimento, tanto os investimentos iniciais relacionados com, por exemplo, a mobilização e desmobilização de equipamento e a localização de manchas de empréstimo adequadas, quanto o investimento esperado em manutenção, são essenciais para avaliar a viabilidade de um projeto de alimentação.

A alimentação artificial pode ter um impacto negativo nos ecossistemas e perturbar a biodiversidade local [8, 21]. No entanto, este impacto é habitualmente temporário por estar sobretudo associado ao período de construção. De qualquer forma, possíveis impactos significativos devem ser adequadamente considerados durante o projeto e mitigados durante a construção.

Num contexto de adaptação climática e estando garantidas as condições de viabilidade técnica e económica (nomeadamente, as relacionadas com a disponibilidade de manchas de empréstimo adequadas), a alimentação artificial é uma das tecnologias de proteção mais interessantes porque garante a flexibilidade necessária para melhorar a resiliência das zonas costeiras. Como a estrutura baseada na natureza não afeta negativamente a dinâmica sedimentar natural, tem potencial para melhorar a biodiversidade local.

2.5.1.2. Estruturas Longitudinais Aderentes

As estruturas longitudinais aderentes são contruídas ao longo da extensão da linha de costa e têm como objetivo reduzir os possíveis galgamentos e erosões em zonas de elevado risco, causados pela agitação marítima. São utilizadas para proteger a zona interior adjacente e podem funcionar como delimitadores de arruamentos, marginais, proteção de estradas e edifícios [21].

Estas estruturas podem ser permeáveis ou impermeáveis, verticais ou inclinadas e podem ter uma estrutura defletora no seu coroamento. Tal como a alimentação artificial, podem ser implementadas em conjunto com outras estruturas de proteção.

As obras longitudinais aderentes podem ser construídas com o intuito de fixar ou mesmo de avançar a linha de costa e, se tiverem uma manutenção adequada, poderão ter um período de vida útil longo. Além disso, são mais fáceis de adaptar a alterações climáticas e necessitam de um menor espaço de projeto, quando comparados com outros tipos de defesa costeira.

No entanto, há uma maior suscetibilidade à erosão na parte frontal da estrutura devido à turbulência causada pela reflexão. Isto acontece porque a turbulência leva à suspensão e perda de sedimentos, que geram uma diminuição do perfil da praia nas alturas de maior agitação marítima, aumentando assim a energia da onda sobre a estrutura e, por sua vez, a instabilidade [21].

Normalmente estas obras são realizadas quando os outros tipos de defesa costeira não são eficazes. Isto é devido ao facto de serem estruturas passivas, devendo ser a última linha de defesa devido ao seu

elevado custo de construção e possivelmente de manutenção, à interferência que tem para com os ecossistemas do local, ao impacte paisagístico e por limitar o acesso ao mar [8, 22].

2.5.1.3. Estruturas Longitudinais Destacadas

As estruturas longitudinais destacadas, como é o caso dos quebramares destacados, são estruturas construídas paralelamente, sem ligação à costa, podendo ter coroamento emerso ou submerso. Estas estruturas de proteção têm o objetivo de proteger a linha de costa através da redução da agitação marítima sobre a mesma, diminuindo assim a erosão e os galgamentos costeiros, e aumentar a área da praia através da retenção de sedimentos.

De forma geral, estas barreiras são construídas com blocos de enrocamento, geossistemas cheios com unidades de areia ou unidades artificiais em betão de diversas formas. De qualquer dos modos, são aconselháveis para zonas com fraca ou moderada ondulação [23].

Apesar destas obras promoverem o desenvolvimento da biodiversidade no local e reterem sedimentos, têm elevados custos de construção e manutenção, causam impactes negativos paisagísticos e na prática de desportos de ondas, podem desencadear conflitos relacionados com a gestão do espaço marítimo e podem provocar uma redução da qualidade da água entre a linha de costa e a estrutura de defesa costeira [22].

2.5.2. AVANÇO

A estratégia de avanço trata-se de uma nova estratégia que, no entanto, já tem vindo a ser utilizada há muito tempo. Semelhante à proteção, consiste em avançar a linha de costa por alimentação artificial e reclamação de terras e estruturas pesadas de engenharia de reforço.

É uma estratégia muito utilizada, especialmente no médio oriente, e sobretudo para desenvolvimento urbano. Trata-se, no entanto, de uma estratégia com elevado custo. Na Europa, foi implementada em zonas na costa da Dinamarca e Países Baixos.

2.5.3. ACOMODAÇÃO

A estratégia de acomodação consiste na adaptação de infraestruturas e mudança temporária de ocupação de atividades humanas numa determinada área vulnerável do litoral, de forma a reduzir os potenciais riscos [9]. Assim sendo, é importante adotar medidas que melhorem a resiliência das zonas costeiras afetadas pela erosão e pelos galgamentos costeiros, processos intensificados pelas alterações climáticas.

Este tipo de estratégia inclui um plano urbanístico resiliente e medidas de prevenção. O plano, com o propósito de obter frentes urbanísticas mais resilientes, inclui o desenvolvimento de barreiras permanentes, pavimentos permeáveis, estruturas verdes, sistemas de drenagem, acomodação de edificações e usos sazonais. Por outro lado, as medidas de prevenção incluem a elaboração de mapas de risco, de forma a ser disponibilizada informação sobre o risco costeiro, e sistemas de alerta a condições adversas, de forma à população ser avisada atempadamente para poder tomar as precauções necessárias e assim, diminuir o risco [16, 22]. Deste modo, através do aumento da resiliência do território, da segurança e da mudança e redução da vulnerabilidade, é possível manter atividades em zonas de risco.

2.5.4. RELOCALIZAÇÃO

A estratégia de relocalização consiste no abandono e relocalização de pessoas, bens e atividades económicas do litoral para zonas interiores de menor vulnerabilidade. Devido às elevadas implicações sociais, económicas e políticas é raramente aplicada, e fortemente evitada e, por isso, só implementada quando as restantes estratégias não são de todo viáveis [8, 9].

Uma vez considerada, tem vários métodos associados como, evitar as zonas de risco, restringir construções nas zonas vulneráveis ao risco, desapropriação de terrenos nas áreas em questão, relocalização com planeamento urbano e abandono devido a danos marítimos [22].

2.6. CASOS DE GALGAMENTOS COSTEIROS

A ocorrência de galgamentos costeiros tem sido cada vez mais frequente, ainda mais com os efeitos das alterações climáticas sobre a variação do nível médio do mar, tornando-se um risco para as populações que tendem a fixar-se próximo à linha de costa, gerando assim consequências para as mesmas.

Deste modo, é importante avaliar as ondas e marés, a erosão, galgamentos e inundações costeiras nas áreas junto à costa, de forma a ser feita uma avaliação do risco e assim, adotar estratégias de adaptação.

2.6.1. PORTUGAL

Cada vez mais as alterações climáticas trazem consequências para a costa portuguesa, tornam os galgamentos costeiros mais frequentes em toda a sua extensão de costa, representando riscos para a maioria da população, que se concentra no litoral.

Em Esmoriz houve danos em infraestruturas e habitações devido a inundações causadas pelo galgamento do paredão. Na zona Central, há frequentes galgamentos ao paredão do Estoril que inviabilizam a circulação pedonal e automóvel, além de afetar a linha férrea. Na Costa da Caparica, o galgamento do paredão já levou à interdição de circulação na zona afetada, além de causar danos às estruturas [24].

No arquipélago dos Açores, na Praia da Vitória ocorreram galgamentos aos quebramares que os destruíram totalmente, e no Porto da Ponta Delgada houve interferências na atividade portuária após o galgamento do quebramar lá existente. Na ilha da Madeira, no Lugar de Baixo, a ocorrência de vários galgamentos num curto período de tempo levou à danificação da marina, que impossibilitou a continuação das suas operações [25].

Deste modo, é de elevada importância analisar e adotar medidas que adaptem e minimizem os riscos associados aos galgamentos costeiros ao longo de toda a costa, tendo em consideração os fatores sociais, económicos e ambientais.

2.6.1.1. Furadouro

A praia do Furadouro, Figura 2.4, é uma área vulnerável com obras de defesa não suficientes para a proteção da zona urbana. Tem vindo a ser fortemente afetada por galgamentos e inundações costeiras, com a subida do nível médio do mar, gerou certas consequências como o recuo da linha da costa, destruição do cordão dunar e de infraestruturas e danos nas próprias obras de proteção.



Figura 2.4 - Praia do Furadouro [22].

Trata-se de acontecimentos regulares, que acontecem durante o inverno, outono e primavera. Desse modo, foram realizados vários estudos sobre como minimizar o risco associado. Maioritariamente baseiam-se na construção de um ou dois quebramares, no entanto, podem vir a gerar consequências negativas nas correntes marítimas e assim, gerar uma maior erosão. Outra opção seria alterar a cabeça do esporão norte já existente, isto iria reduzir os galgamentos em condições de forte agitação, no entanto, ainda haveria galgamentos de menor intensidade ao longo de toda a linha marginal [22, 15].

2.6.1.2. Praia da Cova Gala, Figueira da Foz

Figueira da Foz é fortemente afetada pelos galgamentos costeiros e pela erosão. A construção do porto e de vários esporões pelas várias praias afetou a dinâmica sedimentar, aumentando os sedimentos em certas praias, como na Praia da Claridade, a norte do porto, e por outro lado, diminuindo a quantidade de sedimentos noutras zonas, como na Praia de Buarcos e na Praia da Cova Gala, que vêm a sofrer um recuo da linha de costa.

Com o porto como barreira aos sedimentos, as praias a sul do mesmo são significativamente afetadas devido a uma redução de sedimentos causada principalmente pelo transporte de deriva litoral e pelo

aumento da frequência e intensidade de eventos extremos. Ao ser uma zona exposta à agitação marítima, fica fortemente vulnerável a estes eventos.

A praia da Cova Gala tem sofrido um recuo significativo da linha de costa, sendo que entre 2010 e 2018 foi observado um recuo de cerca de 50 m, com a taxa de erosão aproximadamente três vezes superior à observada entre 1958 e 2010 [26].

Esta praia é constituída por várias estruturas longitudinais aderentes ao longo de toda a sua extensão. Mesmo assim, devido aos eventos extremos registados, estas estruturas já necessitaram ser reforçadas. A Figura 2.5 mostra alguns danos causados nas estruturas devido à ação energética das ondas.



Figura 2.5 - Danos provocados por um evento extremo na Praia da Cova de Gala [27].

Além destas obras pesadas serem vistas como boas estratégias de proteção aos galgamentos costeiros e à erosão nesta zona, também existem estudos que defendem a alimentação artificial como estratégia adicional, havendo a opção do *bypass*, que corresponde à transposição de areia da zona norte, onde os sedimentos têm vindo a se acumular, para a zona a sul do porto, onde se verifica um acentuado recuo da costa, compensando assim as interferências causadas pela construção do porto [7].

A praia também já passou por vários processos de alimentação artificial. Através da combinação destas duas estratégias, há uma maior proteção da costa à erosão e aos galgamentos costeiros, havendo uma maior preservação da cidade que se encontra em zona de forte risco costeiro. No entanto, o risco continua eminente, a dinâmica sedimentar leva à necessidade de novas intervenções de alimentação e a erosão e os galgamentos continuam a ser fatores a ter em conta.

2.6.2. INTERNACIONAIS

2.6.2.1. Gâvres, Bretanha, França

A Praia de Gâvres, Figura 2.6, é uma área vulnerável a galgamentos costeiros, influenciados pela subida do nível médio do mar e pela forte ondulação. Em dias de tempestade a área urbana é inundada, afetando as infraestruturas construídas próximo à praia.



Figura 2.6 - Praia de Gâvres, Bretanha, França [2, 28].

Deste modo, vários estudos têm vindo a ser realizados para monitorizar a linha de costa e, assim, obter alternativas eficazes de proteção marítima costeira [2, 29]. Estas alternativas podem ser desde sistemas de alerta de tempestade até à construção de obras de engenharia pesada.

2.6.2.2. Praia de Waikiki, Havai

A praia de Waikiki é um dos principais pontos de turismo do Havai. Trata-se de uma extensa praia com vários paredões e esporões ao longo da sua costa, complementada por alimentação artificial.

Com o desenvolvimento humano e os efeitos das alterações climáticas, como aumento do nível do mar e aumento da frequência e intensidade de eventos extremos, esta praia tem vindo a ser significativamente afetada, através de erosão e galgamentos costeiros em toda a sua extensão.

A combinação da maré cheia com a forte agitação marítima tem gerado danos nas estradas, passeios marítimos e infraestruturas próximos à zona de rebentação.

A praia de Waikiki é composta por vários sectores. A Praia Fort DeRussy, a Praia Halekūlani e a Praia Royal Hawaiian, apresentadas na Figura 2.7, são alguns desses sectores que têm apresentado riscos costeiros.



Figura 2.7 - Galgamentos ocorridos na Praia de Waikiki: A - Praia Fort DeRussy; B - Praia Halekūlani; C - Praia Royal Hawaiian [Adaptado de [30].

A Praia Fort DeRussy tem sido fortemente afetada pela erosão e perda de sedimentos, em especial na zona Este da praia e por galgamentos sobre o passeio marítimo, que foi construído sobre um paredão. Na praia Halekūlani, o paredão com passeio marítimo que constitui o único acesso junto à costa entre estas três praias, encontra-se atualmente interdito devido a danos na sua estrutura causados por galgamentos. Relativamente à praia Royal Hawaiian, com o aumento do nível do mar tem se vindo a

observar um espraiamento máximo superior, que em simultâneo com a agitação marítima, provoca o galgamento das estruturas que se encontram próximo à linha de costa [30].

Deste modo, torna-se necessário estudar o desenvolvimento da praia, de forma a adaptá-la aos perigos eminentes, considerando sempre os possíveis efeitos futuros. Foram propostas várias ações baseadas na manutenção da alimentação artificial para as praias Fort DeRussy e Royal Hawaiian, e na construção de esporões para a praia Halekūlani [30]. Estas medidas irão minimizar os riscos costeiros, no entanto, estes não serão eliminados.

2.6.3. Síntese Conclusiva

Com o aumento da ocorrência de erosão e galgamentos costeiros, é cada vez mais importante o estudo de estratégias alternativas de adaptação nas zonas costeiras.

Tanto a nível nacional como internacional há cada vez mais riscos associados a tais acontecimentos, o que promove o desenvolvimento de alternativaspara a minimização dos mesmos.

Ao longo de toda a costa portuguesa e de muitas outras zonas costeiras pelo mundo, têm vindo a ser implementadas estruturas de proteção para reduzir. Impacto de eventos extremos e tempestades, no entanto, a forte agitação marítima, a falta de espaço e de um adequado planeamento do território, entre outros, são fatores que condicionam a tomada de decisão e, muitas vezes, impossibilitam a implementação de estratégias mais adequadas do ponto de vista da adaptação climática aos riscos costeiros.

De igual forma, é importante não só olhar para ocorrências passadas mas recomeçar também a preparar eventos futuros, considerando adequadamente no planeamento e projeto para o desenvolvimento de zonas costeiras, diferentes cenários de projeção da subida do nível médio da água do mar e outros efeitos esperados das alterações climáticas.

3
CARATERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

3.1. PRAIA FORMOSA

A Praia Formosa, apresentada na Figura 3.1, situa-se na costa sul da ilha da Madeira, no Funchal. Esta praia, com orientação NW-SE, tem uma extensão aproximada de 1000 m entre os promontórios rochosos, Ponta da Cruz e Ilhéu da Praia Formosa. No seu limite a NW a Praia Formosa possui também um pontão delimitado por enrocamento que conecta um aterro da praia adjacente ao Ilhéu da Praia Formosa. Estas delimitações laterais da praia têm uma saliência de aproximadamente 100 m em relação ao alinhamento da linha de costa, o que condiciona o transporte natural de sedimentos de e para as zonas adjacentes.



Figura 3.1 - Vista panorâmica e localização da Praia Formosa na ilha da Madeira.

A Praia Formosa é delimitada por uma defesa frontal, uma obra longitudinal aderente de muro vertical com estrutura defletora no coroamento, de 2 a 3 m de desnível em relação à praia [31]. Esta obra suporta o passeio marítimo, que margina instalações hoteleiras e de restauração, parques de estacionamento, um campo de futebol e terrenos privados sem qualquer uso atualmente.

Em especial, durante a época balnear, esta praia é muito procurada tanto por locais, como por turistas, principalmente devido às instalações hoteleiras e de restauração presentes ao longo da marginal, mas também por existirem aí boas condições de acesso ao mar, e para a prática de desporto.

É, no entanto, uma praia sujeita a erosão e a galgamentos costeiros sob condições de agitação marítima adversas. Estes fenómenos são responsáveis por danos nas estruturas próximas à linha de costa, tanto em instalações de restauração, como nas escadas de acesso ao mar e na própria estrutura marginal.

3.2. ANÁLISE TEMPORAL

A Praia Formosa, desde que se tem conhecimento, é formada por uma acumulação de balastros e estende-se desde o ilhéu da praia formosa até o promontório basáltico da Ponta da Cruz que contém um boqueirão, caverna resultante da erosão do maciço basáltico [32].

Até meados do século XX o lado nascente da praia era delimitado pelo boqueirão, no entanto, nos tempos atuais, este encontra-se com uma linha de água de aproximadamente 20 metros, como é possível observar na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Vista leste da Praia Formosa entre 1934 e 1939 (esquerda); boqueirão e limite leste da Praia Formosa em 2014 (direita) [32].

Esta praia foi afetada pela extração de sedimentos na primeira metade do seculo XX, associado à construção das infraestruturas portuárias do funchal, a leste da praia. Nessa altura a marginal era ocupada por atividade agrícola, especialmente cultivos de bananeiras.

Na segunda metade do século XX, esta passou a ser ocupada também por atividades industriais, que a partir do final desse mesmo século passaram a ser predominantes – sobretudo atividades associadas a instalações hoteleiras e de restauração. Com estas construções, foram construídos muros de proteção e um passeio marítimo que ocuparam parte do espaço que era previamente ocupado pela praia, deixando-a mais vulnerável a eventos extremos. Estas construções mantêm-se até os dias de hoje, como se pode observar na Figura 3.3.

Entre 1994 e 1995 deu-se a construção do pontão na zona leste da praia, delimitado pelo enrocamento que conecta o aterro da praia adjacente ao Ilhéu da Praia Formosa. Nos anos seguintes observou-se uma retenção de sedimentos a oeste do pontão, uma forte sedimentação devido à interrupção do transporte sedimentar a barlamar do pontão e, consequente recuo da linha de costa a sotamar do mesmo na Praia Formosa, como é observado na Tabela 3.1.

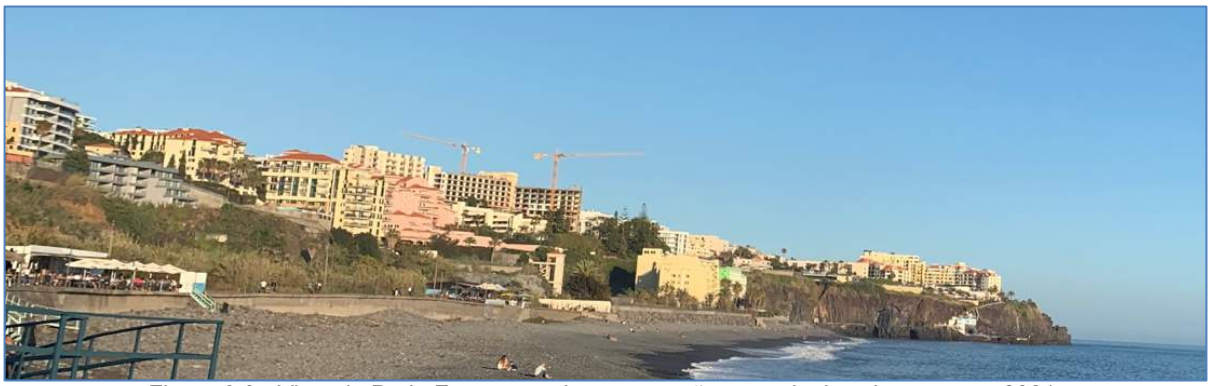


Figura 3.3 - Vista da Praia Formosa e das construções marginais existentes em 2021.

Tabela 3.1 - Variação do recuo médio ao longo dos anos (Adaptado de [32])

Anos	1963 - 1999	1999 - 2004	2004 - 2007
Recuo médio [m]	10	0.5	6

Apesar da acumulação e erosão serem influenciados pela construção do pontão, não dependem apenas desta, pois há uma contínua perda sedimentar na praia, mesmo após a saturação da capacidade de retenção a oeste da construção [32].

Os avanços e recuos observados hoje em dia são pouco acentuados e estão principalmente relacionados com a variação da agitação marítima, sendo a zona oeste da praia mais propícia ao recuo da linha da costa e a zona leste ao avanço da mesma [31].

3.2.1. Relatos de Acontecimentos

As construções hoteleiras, de restaurantes, do complexo balnear e do passeio marítimo sobre espaço pertencente anteriormente à praia, proporcionaram um aumento de galgamentos costeiros. Na Tabela 3.2 encontram-se alguns eventos ocorridos ao longo dos anos na praia formosa, sendo que na Figura 3.4, encontra-se um exemplo da agitação marítima e dos danos provocados por galgamentos.



Figura 3.4 - Agitação marítima e danos causados pela mesma, em fevereiro de 2022 [33, 34].

Tabela 3.2 - Algumas ocorrências relacionadas com galgamentos costeiros

Ano	Dia e Mês	Ocorrências
1995	2 de novembro	Danos: restaurantes, feridos ligeiros, passeio marítimo
1996	1 de fevereiro	Danos: passeio marítimo
1997	5 – 8 de dezembro	Danos: passeio marítimo, projeção de calhaus sobre o mesmo
	14 de dezembro	Danos: restaurantes, parque de estacionamento e passeio marítimo
2001	17 de setembro	Danos: passeio marítimo
2005	10 – 11 de março	Danos: estruturas da orla costeira e passeio marítimo
2008	8 de abril	Ondulação: 6 m Danos: Estruturas da orla costeira e passeio marítimo
2010	16 de fevereiro	Danos: restaurantes, estruturas da orla costeira e passeio marítimo
2018	28 de fevereiro	Ondulação: 5 – 7 m, W/SW Danos: estruturas da orla costeira, passeio marítimo
	13 de outubro	Ondulação: 5 – 7 m, W Danos: estruturas da orla costeira e passeio marítimo
	18 de novembro	Ondulação: 4 – 5 m Danos: estruturas da orla costeira e passeio marítimo
2019	24 de fevereiro	Danos: restaurantes, estruturas da orla costeira e passeio marítimo
2021	4 de janeiro	Danos: passeio marítimo
	1 de fevereiro	Ondulação: 4 – 4.5 m Danos: restaurantes, passeio marítimo, projeção de calhaus sobre o mesmo
	18 de março	Danos: passeio marítimo, projeção de calhaus sobre o mesmo
	25 – 26 de dezembro	Ondulação: 2 – 4.5 m, W/SW Danos: estruturas da orla costeira e passeio marítimo
	31 de dezembro	Danos: passeio marítimo, projeção de calhaus sobre o mesmo
2022	17 de janeiro	Ondulação: 2.5 – 3.5 m, SE Danos: estruturas da orla costeira e passeio marítimo
	1 de fevereiro	Danos: estruturas da orla costeira e passeio marítimo
	18 – 20 de fevereiro	Ondulação: até 3 m Danos: estruturas da orla costeira e passeio marítimo

Apesar de não existir uma base de dados oficial referente às ocorrências de galgamentos costeiros, pode inferir-se a partir de relatos e notícias sobre danos na frente marginal, que se trata de uma praia sujeita a galgamentos costeiros na sequência de eventos de tempestade.

3.3. DINÂMICA SEDIMENTAR

A Praia Formosa é composta principalmente por areia, cascalho e balastros derivados maioritariamente de rocha basáltica devido à formação geológica da ilha ser oriunda de atividade vulcânica.

A parte superior da praia é constituída por balastros de diâmetro médio superior a 2 mm, sendo que no topo, próximo à marginal, há blocos e seixos até os 300 mm. Na praia em geral predomina cascalhos com cerca de 50 mm de diâmetro que se misturam próximo ao mar com fragmentos arenosos até 0.15 mm de diâmetro [31, 32]. A oeste da praia, a oeste do pontão e do ilhéu, há uma acumulação de sedimentos arenosos.

Na região submersa, até os - 10 m de profundidade é predominante areias finas e alguns fundos rochosos e até os -15 m há um fundo rochoso sobreposto por areia e cascalho [31]. Trata-se de uma plataforma costeira estreita com declives acentuados.

3.4. CONDIÇÕES MARÍTIMAS

As condições marítimas são o principal fator responsável pela ocorrência de galgamentos costeiros e pelo transporte sedimentar. Estas condições podem ser determinadas a partir da boia-ondógrafo do Funchal, do Instituto Hidrográfico (IH) gerida pela Administração dos Portos da Região Autónoma da Madeira (APRAM) que se encontra a 100 m de profundidade a 32°37.34' N, 16°56.70' W (sistema de coordenadas WGS84), como mostra a Figura 3.5.



Figura 3.5 – Localização da boia-ondógrafo do Funchal.

Estes dados são registados em séries temporais de 10 minutos, usadas para processamento em tempo real e com intervalo de cerca de 2 minutos entre séries, e também em séries temporais de 30 minutos com processamento posterior e intervalo habitual de 3h entre séries. Em caso de temporal, ou seja, quando a altura de onda significativa é superior a 3 metros na Região Autónoma da Madeira, este intervalo é inferior a um minuto [35].

Neste estudo, foram então analisados os dados entre dezembro de 1996 e dezembro de 2021, obtidos pelo método espetral. Estes dados incluem a altura significativa, o período médio e de pico, e a direção média de propagação de ondas associada ao período de pico.

Relativamente à altura significativa, como é possível observar na Figura 3.6, os valores médios anuais apresentam uma pequena variação, no entanto, os valores máximos anuais variam significativamente ao longo dos anos.

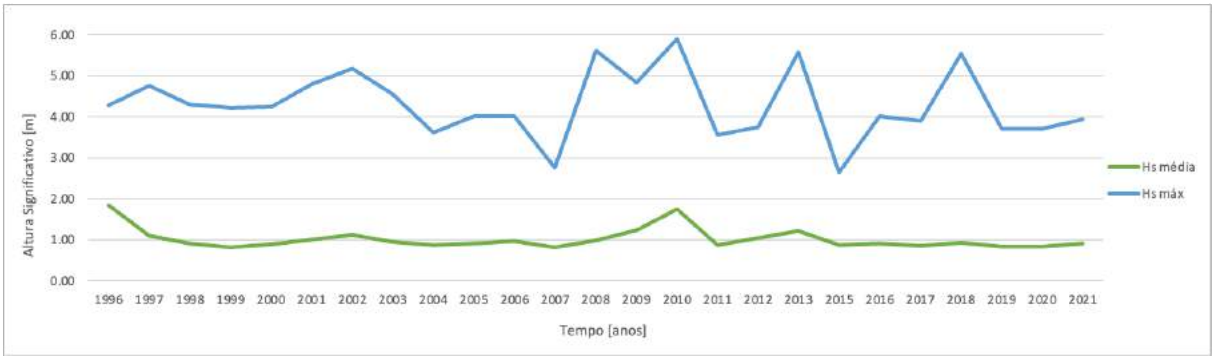


Figura 3.6 - Variação anual da altura de onda significativa média e máxima.

Desde 2008 até aos tempos atuais, são observados valores de altura de onda significativa mais elevados que anos anteriores e com maiores variações. Estas variações podem estar relacionadas com o efeito das alterações climáticas, uma vez que este pode causar um aumento da intensidade, frequência e duração de eventos extremos. Estes acontecimentos, por sua vez, podem causar instabilidades no balanço sedimentar e o recuo da linha de costa e atuam através do aumento de erosão e da frequência e intensidade de galgamentos e inundações costeiras.

As direções de propagação das ondas encontram-se representadas na Figura 3.7, distribuídas por classes de altura de onda significativa e com uma amplitude de 22.5°, referenciadas ao norte geográfico. É possível concluir que oeste é a direção predominante independentemente da altura de onda e que as alturas de onda significativas menores que 1.75 m são significativamente mais frequentes.

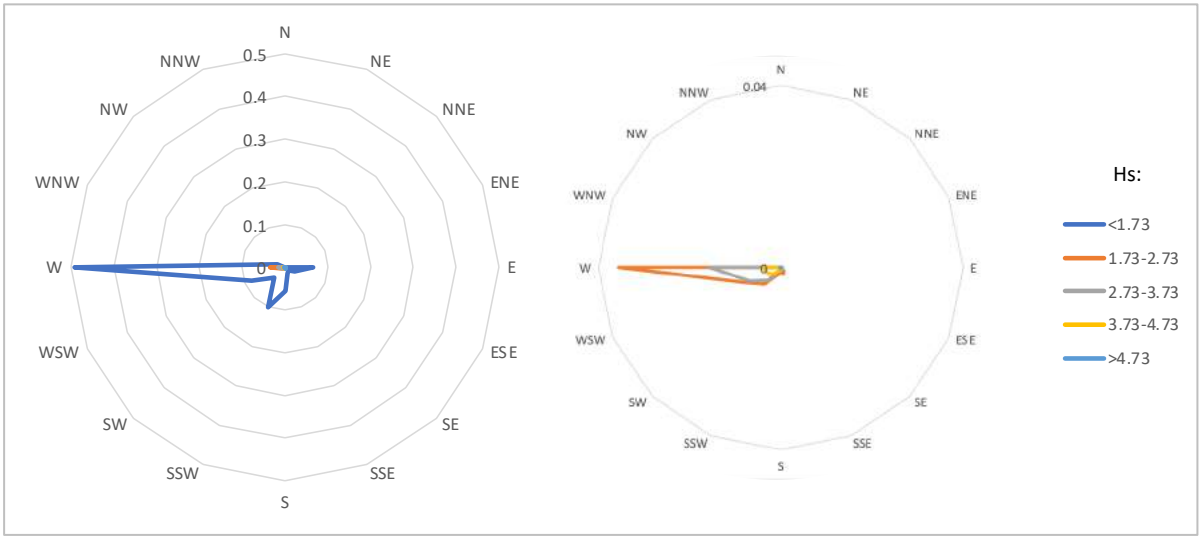


Figura 3.7 - Direções de propagação das ondas distribuídas por classes de altura de onda significativa obtidas pela boia do Funchal entre 1997 e 2021.

Por outro lado, na Figura 3.8 está representada a frequência do período médio do mesmo intervalo temporal, através da qual é concluído que as ondas mais frequentes possuem um período médio entre os 4 e 6 segundos.

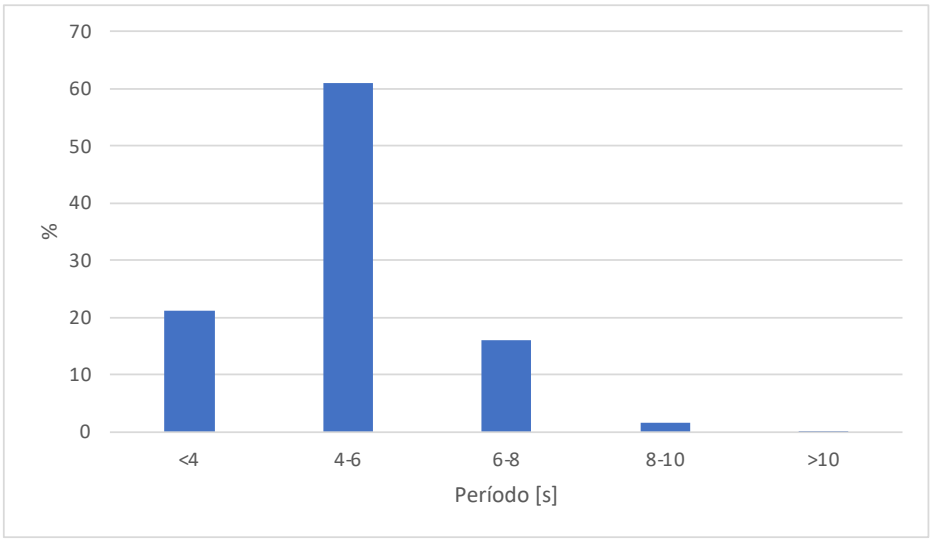


Figura 3.8 - Frequência dos períodos médios obtidos pela boia do Funchal entre 1997 e 2021.

3.5. EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA

A evolução da linha de costa na praia Formosa teve como base a análise de imagens de satélite. Para tal foi utilizada a ferramenta *CoastSat* com base em *Python* e imagens de satélite obtidas pelo *Google Earth Engine*. A metodologia utilizada para o estudo da evolução da linha de costa na Praia Formosa é apresentada na Figura 3.9.

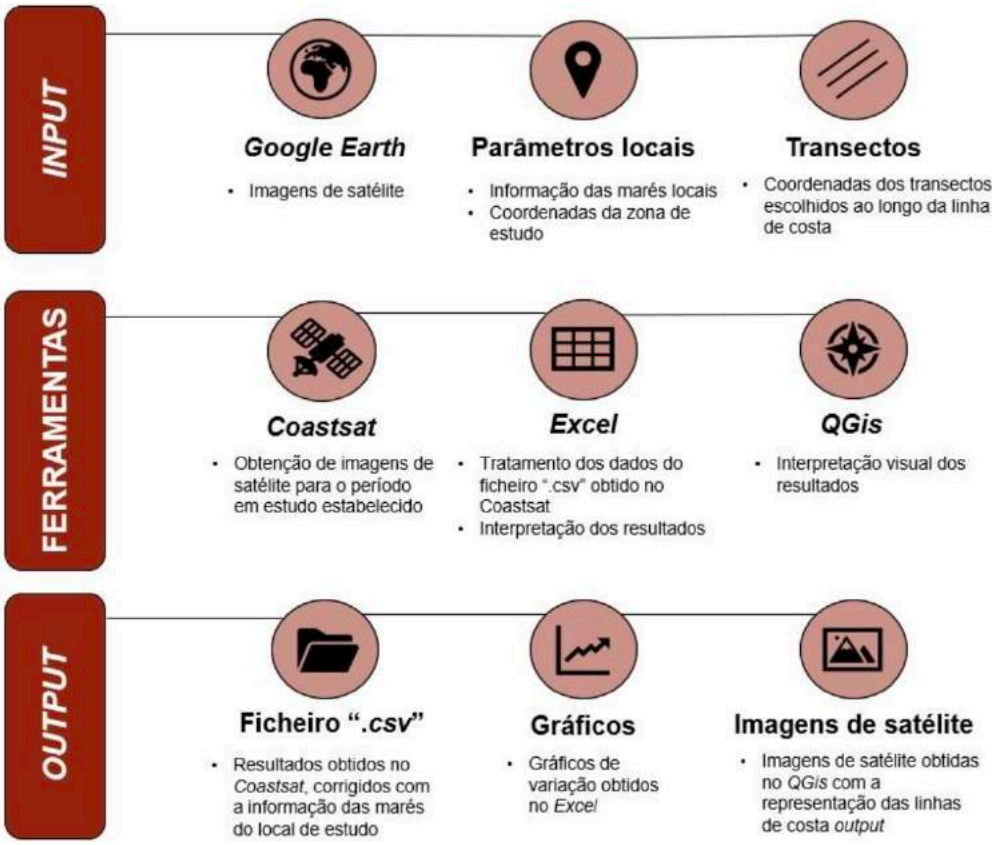


Figura 3.9 - Passos do processamento da informação do CoastSat [36].

Utilizou-se o EPSG mundial 4326 com 11 transectos perpendiculares à linha de costa, apresentados na Figura 3.10, e marés compreendidas entre 1900 e 2022. Deste modo, com recurso à missão de satélite *Landsat-5* e para o período 1996 - 2021, O *CoastSat* detetou um conjunto de imagens, entre 2016 e 2021, através das quais processou os *inputs* e criou os *outputs*.



Figura 3.10 - Distribuição dos 11 transectos pela Praia Formosa.

Através do QGis, um Sistema de Informação Geográfica *opensource*, e do excel, foi possível analisar os dados obtidos e a variação da linha da costa ao longo dos anos. Uma vez tendo as coordenadas A e B (coordenadas dos transectos), foi possível obter as coordenadas C com recurso ao ficheiro output correspondente às coordenadas da linha de costa, [AC]. Este cálculo foi baseado na Figura 3.11 e calculado com recurso às Equações 5 a 8, que mostram um exemplo de cálculo para o primeiro ponto. As coordenadas dos transectos e os resultados obtidos encontram-se no Anexo A.

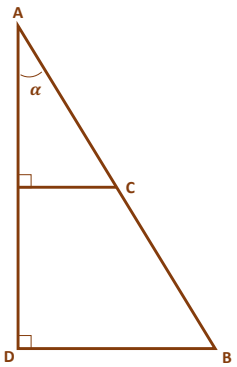


Figura 3.11 - Esquema usado para o cálculo das coordenadas.

$$AB = \sqrt{[AD]^2 + [BD]^2}$$
$$= \sqrt{74.05^2 + [-147.59]^2} = 165.12\ m \quad (5)$$

$$asseno(\alpha) = \frac{[DB]}{[AB]} = 0.465$$
$$\Leftrightarrow\ \alpha = sen(0.465) = 25.7° \quad (6)$$

$$y_C = y_A - [[AC] \times cos(\alpha)] \\ = 3847922.1 - [79.53 \times cos(25{,}7)] = 3847854.7 \tag{7}$$

$$x_C = x_A - \left[[AC] \times sen(\alpha)\right] \\ = -1887591.5 - [79.53 \times sen(25{,}7)] = -1887633.8 \tag{8}$$

Posteriormente calculou-se a distância da linha de referência à linha de costa para cada transecto, através da Equação 9. Como pontos de referência foram considerados os dados da primeira data detetada, 5 de novembro de 2016. Com estes valores de referência e com as coordenadas da linha de costa presentes no ficheiro *output* foi possível calcular a diferença entre os mesmos através da Equação 10 e, deste modo, observar a variação da linha de costa. Este cálculo foi baseado na Figura 3.12.

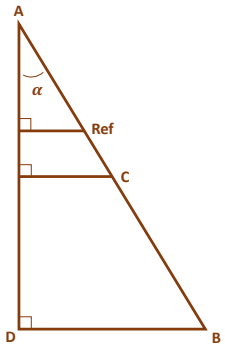


Figura 3.12 - Esquema usado para o cálculo variação da linha de costa.

$$[A \rightarrow Ref] = \sqrt{\left(x_{Ref} - x_A\right)^2 + \left(y_{Ref} - y_A\right)^2} \\ [A \rightarrow Ref] = \sqrt{\left(-1887633.8 - (-1887591.5)\right)^2 + (3847854.7 - 3847922.1)^2} \\ = 79.53\ m \tag{9}$$

$$[A \rightarrow Ref] = [AC] - [Ref] \\ = 81.32 - 79.53 = 1.79\ m \tag{10}$$

A variação da distância da linha de costa à linha de referência (5 de novembro de 2016) pode ser observada nas Figuras 3.14, 3.15 e 3.16, dadas para os primeiros 3 transectos, para os 4 seguintes e para os 4 últimos, respetivamente.

Para uma melhor análise da variação da linha de costa, foram determinadas as tendências de cada transecto, a distância que a linha de costa tende a avançar ou recuar por ano e, deste modo, determinar a classe da variação em questão. Para isso, considerou-se os valores da Figura 3.13 como os limites para cada classificação. Na Tabela 3.3, encontram-se os valores de tendência obtidos para cada transecto através do declive das linhas de tendências apresentadas nas Figuras 3.14, 3.15 e 3.16.

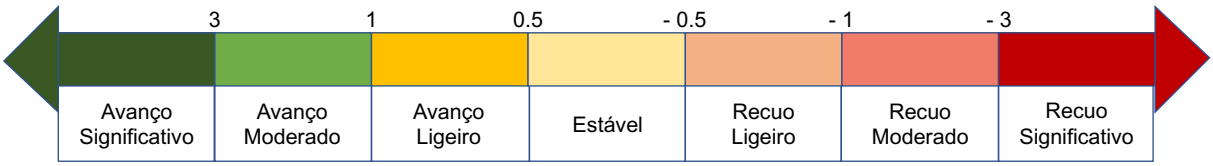


Figura 3.13 - Limites das taxas de recuo e avanço da linha de costa, em m/ano, e respetiva classificação.

Tabela 3.3 - Tendência da evolução da linha de costa para cada transecto e respetiva classificação

Transectos	Tendência [m/dia]	Tendência [m/ano]	Classificação
1	-0.0016	-0.5840	Recuo ligeiro
2	-0.0058	-2.1170	Recuo moderado
3	-0.0037	-1.3505	Recuo moderado
4	-0.0015	-0.5475	Recuo ligeiro
5	-0.0001	-0.0365	Estável
6	0.0017	0.6205	Avanço ligeiro
7	0.0024	0.8760	Avanço ligeiro
8	0.0018	0.6570	Avanço ligeiro
9	-0.0011	-0.4015	Estável
10	-0.0038	-1.3870	Recuo moderado
11	-0.0040	-1.4600	Recuo moderado

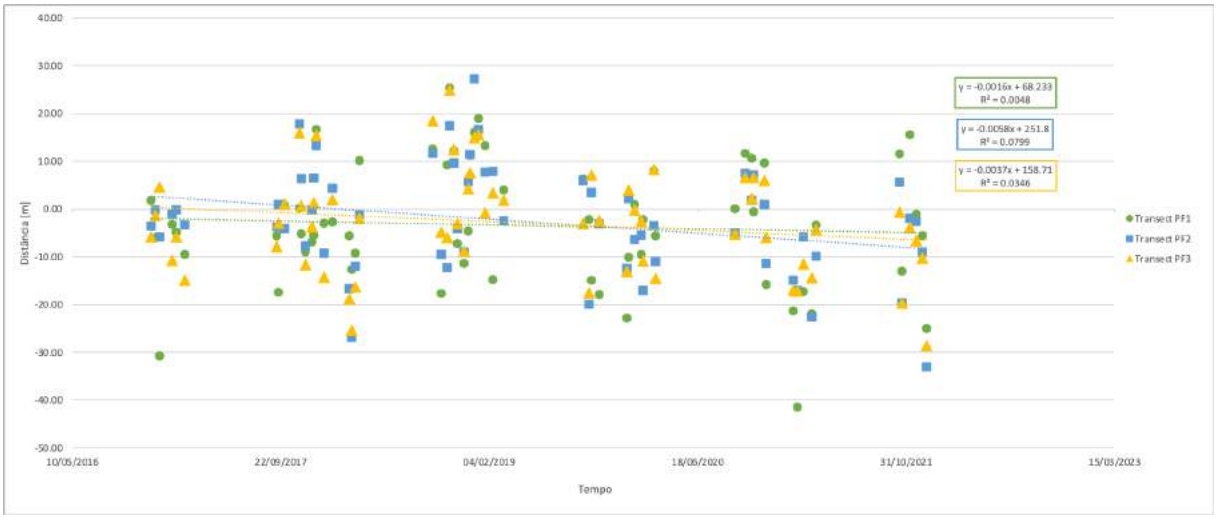


Figura 3.14 – Variação da linha da costa em relação à linha de referência, nos primeiros 3 transectos.

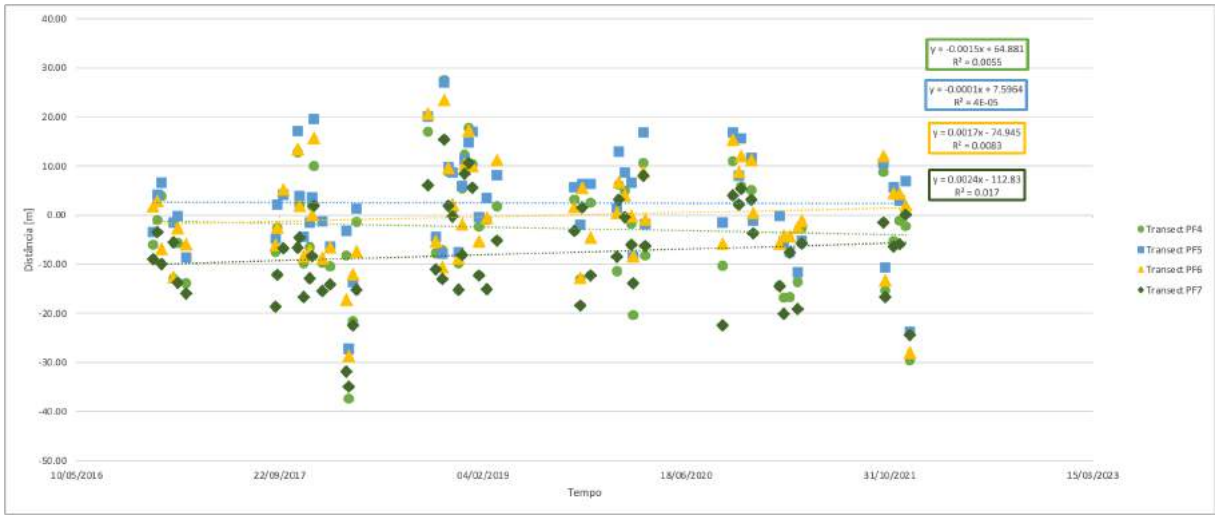


Figura 3.15 - Variação da linha da costa em relação à linha de referência, nos transectos 4 a 7.

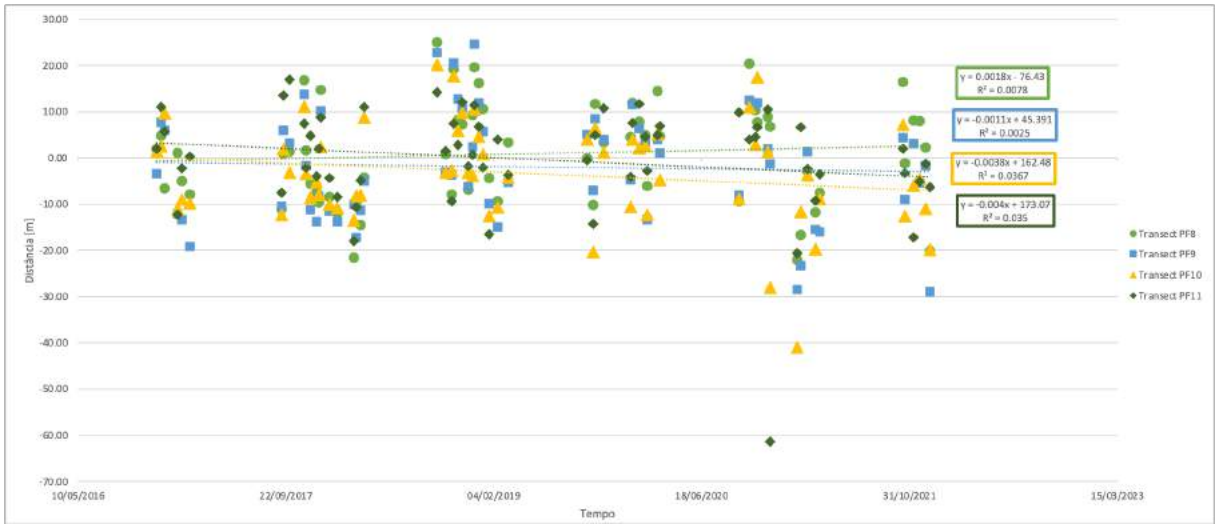


Figura 3.16 - Variação da linha da costa em relação à linha de referência, nos últimos 4 transectos.

Estes resultados permitem concluir que houve avanços e recuos da linha de costa ao longo dos anos. No entanto, considerando todo o período analisado (2016-2021), apenas nos transectos 5 e 8 é que existe um avanço significativo, nos restantes transectos predomina o recuo da linha de costa. O avanço máximo registado ocorreu a 31 de outubro de 2018 no transecto 4 com um valor de 27.47 m, enquanto que o maior recuo foi registado no transecto 11 no dia 29 de novembro de 2020 com um valor de -61.36 m.

Foi obtida uma predominância de recuo da linha de costa, tendo apenas os transectos 6, 7 e 8 a tendência de avanço, embora ligeiro. Deste modo, as duas extremidades da praia têm tendência a recuar, seguidas de uma zona estável que liga a uma zona mais reduzida de avanço. Esta variação da linha de costa mostra que a praia tende a estar mais exposta a galgamentos costeiros e erosão com o passar dos anos, daí ser importante analisar o seu desenvolvimento de modo a desenvolver alternativas de proteção sustentável e que promova a redução da probabilidade de ocorrência e da intensidade dos riscos costeiros.

3.6. ESTUDOS ANTERIORES

Até a data, foram realizados diversos estudos para reduzir os riscos costeiros na zona costeira adjacente à Praia Formosa, tendo em consideração fatores como a sustentabilidade, a adaptação a alterações climáticas, a qualidade da paisagem e da própria zona e o desenvolvimento económico através do turismo e de atividades lúdicas.

3.6.1. ESTUDO DE ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL

Foi analisada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil a viabilidade da alimentação artificial da praia através do depósito de areia branca grossa sobre o fundo de sedimentos existentes [31].

Desenvolveram duas alternativas com o perfil apresentado na Figura 3.17, que se baseiam na alimentação artificial em conjunto com a construção de um esporão a Este da praia. A opção A aposta na posterior distribuição natural das areias desde a berma até à profundidade de fecho, enquanto que a opção B tem adicionalmente uma soleira submersa para retenção das areias.

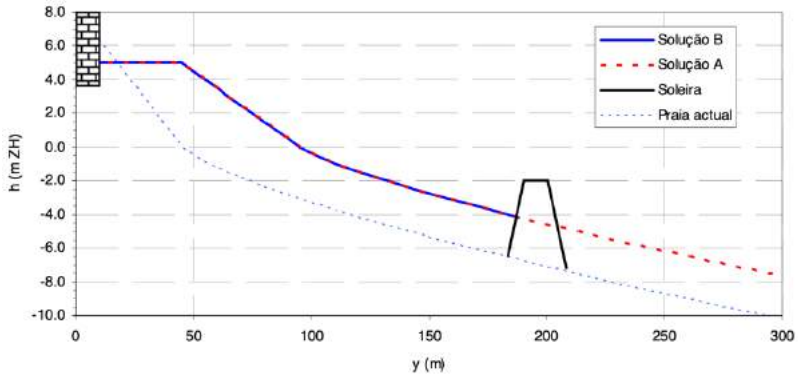


Figura 3.17 - Perfil da praia segundo as alternativas apresentadas [31].

Em 2005 foram realizadas simulações em modelo físico para ambas as alternativas e para condições extremas e normais de agitação marítima. Para condições normais foi verificado um desenvolvimento da praia no sentido do perfil de equilíbrio para as duas alternativas, no entanto, em condições extremas ocorreram movimentações significativas dos sedimentos [31]. Espera-se que na solução A haja transporte de sedimentos para maiores profundidades. Na solução B espera-se que ocorram transposições de sedimentos sobre a soleira submersa, contudo, a solução B tem uma maior viabilidade no sentido de proporcionar menores perdas de areia e estas alcançarem menores profundidades.

Neste estudo foi também utilizado o modelo numérico LITPROF do sistema de modelação LITPACK para simular o perfil das alternativas A e B em condições extremas, de forte agitação marítima [31]. Foram obtidos os perfis apresentados na Figura 3.18, onde a soleira da opção B atua como obstáculo aos sedimentos que são transportados por ação da agitação marítima e na solução A ocorre uma erosão muito provavelmente irreversível. Do mesmo modo, o recuo de linha de costa no lado Oeste da praia será superior ao avanço no lado Este da solução A, e estes valores serão superiores aos da solução B.

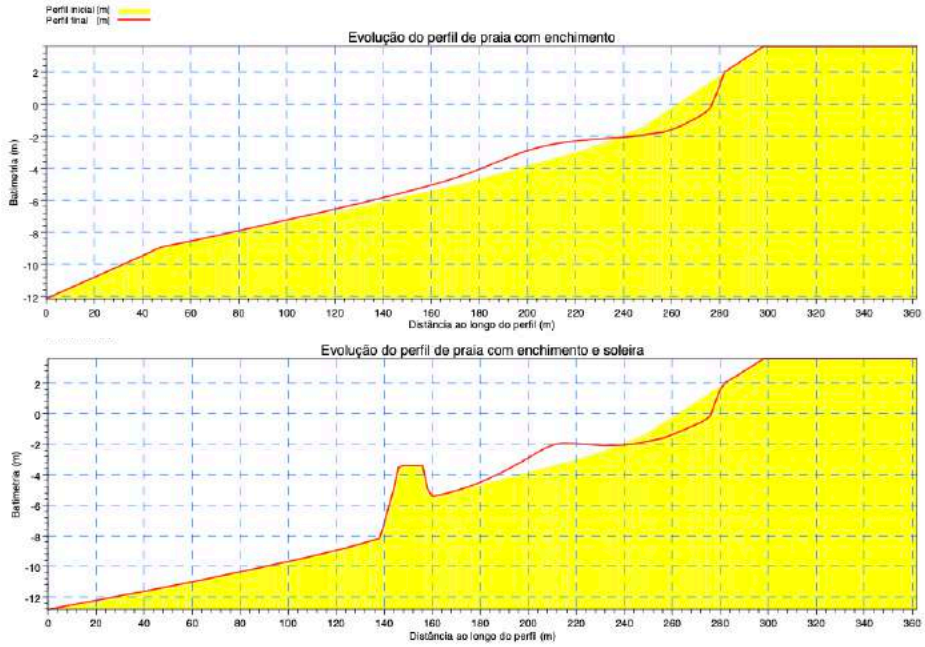


Figura 3.18 - Perfil das alternativas A e B, afetadas por condições extremas de agitação marítima [31].

A opção B apresenta-se como a alternativa mais viável pois permite um menor declive dos fundos e um menor transporte sedimentar para zonas mais profundas, sofrendo assim menor erosão e tendo portanto uma maior durabilidade. No entanto, em qualquer alternativa analisada, a geometria do perfil será afetada e será necessária reposição do enchimento. A forte agitação marítima, que se verifica cada vez mais devido aos efeitos das alterações climáticas, terá sempre efeitos negativos na erosão da praia, deixando-a mais vulnerável a galgamentos.

Por outro lado, o muro marginal ao passeio marítimo é uma estrutura de proteção aos galgamentos. Uma vez que seja implementada a alimentação artificial, a estrutura defletora no coroamento poderá também contribuir para a erosão e o transporte sedimentar de areia para maiores profundidades quando ocorra galgamentos costeiros derivados da forte agitação marítima.

Deste modo, avançar com a alimentação artificial de areia grossa implica uma constante monitorização, mesmo após a finalização da alimentação, a necessidade de recursos para a reposição da mesma com o avançar do tempo e a existência de capital para tais processos.

Assim, se o projeto de alimentação artificial de areia (grossa) avançar, será necessário continuar a monitorizar a praia, após a finalização da alimentação e, previsivelmente, garantir recursos para a sua manutenção periódica.

3.6.2. Estudo de Arranjo Paisagístico da Marginal e do Acesso à Praia

A proposta de intervenção de uma aluna de mestrado apresentada na Figura 3.19 tem em consideração o Plano de Pormenor da Praia Formosa. Trata-se de um estudo de arquitetura paisagista que propõe o desenvolvimento da marginal através de áreas verdes com um passeio marítimo, zonas para atividades de lazer e algumas construções na marginal [37].

A proposta inclui também a construção de duas estruturas de acesso ao mar, um passadiço de madeira assente numa plataforma flutuante e uma rampa que acompanha o perfil da praia até a zona de rebentação

[37]. Se implementada sem ser complementada por um estudo de engenharia costeira sobre estratégias de adaptação, este conceito continuará a estar sujeito a erosão e galgamentos costeiros devido à forte agitação marítima, uma vez que a intervenção está circunscrita à zona interior.

Assim, a construção de novas infraestruturas ao longo da frente marítima sem alterar as estruturas de proteção, poderá aumentar a magnitude dos danos provocados pela erosão e pelos galgamentos costeiros em relação ao verificado atualmente.



Figura 3.19 - Proposta de intervenção [37].

3.6.3 Síntese Conclusiva

Até ao momento foram realizados poucos estudos para melhoria do risco costeiro na Praia Formosa. O estudo mais desenvolvido foi realizado em 2005, e propunha a alimentação artificial com areia grossa. No entanto, não teve continuidade, fundamentalmente devido ao custo associado e às necessidades esperadas de monitorização e de manutenção. A construção de novas infraestruturas sem alteração da estrutura de proteção também não traria benefícios a médio-longo prazo devido à forte ondulação que se faz sentir, especialmente na época de inverno.

Não obstante, devido ao seu elevado valor económico e social, é importante analisar e avaliar a situação atual na Praia Formosa e a sua evolução histórica com vista à geração de possíveis estratégias e medidas de proteção considerando também cenários de alterações climáticas.

4
CONCEÇÃO PRELIMINAR DE ALTERNATIVAS

4.1. CONCEÇÃO PRELIMINAR

Tanto para a análise de galgamentos costeiros como para a implementação de obras de proteção é indispensável a elaboração de estudos bem desenvolvidos e complexos, com base nas condições ambientais presentes e esperadas no futuro, específicas do problema em causa.

É importante realizar previsões iniciais que estimem o caudal de galgamento médio da situação atual da zona costeira e compará-los com possíveis situações futuras, através da previsão do galgamento em diferentes estruturas, com diferentes parâmetros. Para isso, é essencial considerar a máxima altura de onda significativa registada no local, de forma a prever o maior galgamento que possa ocorrer.

Para tal, poderão ser utilizadas diversas ferramentas, como fórmulas semi-empíricas e a rede neuronal *XBG-Overtopping*. Estas ferramentas são condicionadas pela geometria da estrutura e pelas condições de onda, sendo que as fórmulas são baseadas na interpolação de resultados de modelos físicos para estruturas simples com uma geometria específica e o *XBG-Overtopping* prevê o galgamento para uma maior gama de geometrias das estruturas [13, 38].

O caudal de galgamento médio é um dos parâmetros mais utilizados para a medição de um galgamento e pode ser calculado segundo a Equação (11. Relaciona a altura de onda significativa na base da estrutura, H_{mo}, com a cota de coroamento, R_c, dada pela distância entre o nível de água e a cota da crista da estrutura. Além destes parâmetros, contém três coeficientes: a, b e c que dependem do tipo da estrutura, estando relacionados com diversos fatores como a rugosidade da estrutura e o ângulo de incidência das ondas [13].

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}}} = aexp\left[-\left(b\frac{R_c}{H_{mo}}\right)^c\right] \qquad (11)$$

Deste modo, o galgamento que ocorre pode ser classificado segundo o caudal médio galgado, como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Classificação do caudal de galgamento médio [adaptado de 13]

Caudal de galgamento médio [l/s/m]	Classificação	Consequências
q < 0.1	Insignificante	Estrutura estável
q = 1	Ligeiro	Solos coesivos (ex: argila, relva) podem sofrer erosão
q = 10	Significativo	Afeta principalmente diques e paredões
q = 100	Muito Significativo	Afeta todo o tipo de estruturas

4.2. FÓRMULAS SEMI-EMPÍRICAS

As fórmulas semi-empíricas são as propostas no EurOtop que é o manual de referência nestes estudos [13]. Para o caso em análise foram estudados dois tipos de estrutura: diques e paredões com crista refletora. O esboço destas estruturas encontra-se representado na Figura 4.1, a azul está representado o talude da praia e a vermelho está representada a própria estrutura.

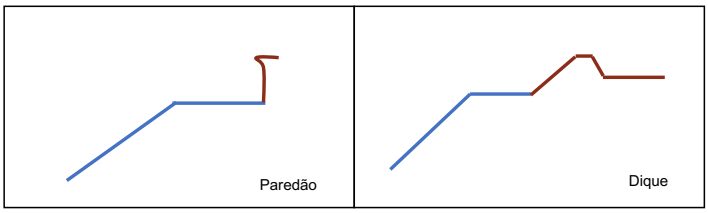


Figura 4.1 – Esboço de um paredão (esquerda) e de um dique (direita).

Na estimativa do galgamento é necessário considerar parâmetros estruturais e parâmetros ambientais locais. Os parâmetros estruturais incluem o declive, a permeabilidade, porosidade, rugosidade e a altura e comprimento das diversas componentes da estrutura, enquanto que os parâmetros ambientais incluem a altura, o período e a declividade da onda, bem como o parâmetro de rebentação e o nível de água [13]. Com estes parâmetros é possível obter o caudal médio ou o volume de galgamento.

Para cada tipo de estrutura analisada, foram considerados três cenários distintos: a estrutura atual com condições atuais (E1C1), a estrutura que seria adequada às condições atuais (E2C1) e a estrutura atual com a subida do nível médio do mar (E1C2).

4.2.1. *INPUTS*

A altura de onda utilizada corresponde ao máximo observado entre 1996 e 2021, sendo o período de pico correspondente a essa altura. O nível do mar trata-se da média neste mesmo período e a elevação do fundo do mar foi determinada segundo a batimetria da praia em questão. Os parâmetros estruturais foram determinados tendo em conta o tipo de praia e a estrutura existente, seguindo as condições determinadas e sugeridas pelo manual EurOtop [13].

Foram utilizados os *inputs* que se encontram resumidos na Tabela 4.2. Através destes inputs, isto é, os parâmetros estruturais, parâmetros ambientais e os fatores de influência, foi possível estimar o galgamento correspondente às diferentes estruturas analisadas, para as condições ambientais definidas.

Tabela 4.2 - Inputs, parâmetros e fatores utilizados nas fórmulas semi-empíricas

Inputs, Parâmetros e Fatores	Unidades	E1C1	E2C1	E1C2
Aceleração da gravidade - g	[m/s²]	9.81	9.81	9.81
Altura de onda significativa do espetro - H_{m0}	[m]	4.66	4.66	4.66
Período de pico - T_p	[s]	10	10	10
Período médio espetral - $T_{m-1,0}$	[s]	9.091	9.091	9.091
Nível do mar	[m]	1.378	1.378	1.878
Inclinação de onda fictícia - $s_{m-1,0}$	[-]	0.036	0.036	0.036
Comprimento de onda - águas profundas - $L_{m-1,0}$	[m]	129.03	129.03	129.03
Parâmetro de rebentação baseado nos parâmetros $s_{m-1,0}$ - $x_{m-1,0}$ [-]	[-]	0.526	0.526	0.526
Ângulo de ataque de onda - β	[°]	0	0	0
Elevação do fundo do mar	[m]	-6	-6	-6
Profundidade da água à frente da base da estrutura - h	[m]	7.378	7.378	7.878
Profundidade da água na base da estrutura - h_t	[m]	7.378	7.378	7.878
Inclinação do talude da praia (1:) - α	[-]	10	10	10
Declive da estrutura (1:)	[-]	100000	100000	100000
Cota de Coroamento	[m]	8.8	31.5	8.8
Bordo livre - R_c	[m]	7.422	30.122	6.922
R_c/H_{m0}	[m]	1.59	6.46	1.49
Altura do *bullnose* - h_r	[m]	1.5	1.5	1.5
Extensão horizontal do *bullnose* - B_r	[m]	1.5	1.5	1.5
Ângulo do *bullnose* - β_r	[°]	45	45	45
Rugosidade - γ_f	[-]	1	1	1
Obliquidade da onda - γ_β	[-]	1	1	1
Parede no fim do declive suave - γ_n	[-]	0.92	0.92	0.92
Berma - γ_b	[-]	1	1	1
Parâmetro R_0*	[-]	0.290	0.298	0.289
Parâmetro m*	[-]	1.108	1.132	1.105
Parâmetro k'	[-]	0.198	0.150	0.199
Parâmetro k_{bn}	[-]	0.004	0.003	0.004

4.2.2. Estrutura Vertical Aderente

Para a análise de um paredão é seguida a formulação apresentada na Tabela 4.3, através da qual são obtidos os resultados apresentados, para cada cenário analisado.

Tabela 4.3 - Resultados do caudal de galgamento costeiro para uma estrutura do tipo paredão

		E1C1	E2C1	E1C2
Influência do litoral Se h/H_{m0} for menor que 4	[-]	1.58	1.58	1.68
Se d/h for maior que 0.6, tratar como vertical	[-]	1	1	1
Possível rebentação se $h^2/(H_{m0}\ L_{m-1,0}) < 0.23$	[-]	0.09	0.09	0.10
Se $Rc/H_{m0} > 1.35$ utilizar fórmula para essas condições	[-]	1.59	6.44	1.48
Caudal de galgamento	[l/m/s]	66.50	0.99	79.33

É observável que, tanto nas condições atuais, como quando considerada a subida do nível médio da água do mar, a estrutura atual sofre galgamentos muito significativos.

4.2.3. Dique com Base Emergente

Para a análise de um dique com base emergente é seguida a formulação apresentada na Tabela 4.4, através da qual são obtidos os resultados apresentados, para cada cenário analisado.

Tabela 4.4 - Resultados do caudal de galgamento costeiro para uma estrutura do tipo dique com base emergente

		E1C1	E2C1	E1C2
Declive maior ou igual a: cot α = 10	[-]	1:10	1:10	1:10
Inclinação de onda fictícia > 0.03	[-]	0.036	0.036	0.036
0.5 ≤ Rc/Hm0 ≤ 1.6	[-]	1.586	6.436	1.479
Galgamento	[l/m/s]	0.0003	5.32E-39	0.0010
Galgamento máximo	[l/m/s]	163.69	0.00003	212.27

Apesar da situação E2C1 diminuir significativamente o caudal de galgamento para valores aceitáveis, certos parâmetros da estrutura, como a distância R_c (cota de coroamento), teriam valores muito irrealistas, muito superiores ao aceitável, tornando-se assim uma opção não viável.

4.2.4. Análise entre estruturas

A comparação dos resultados para cada tipo de estrutura considera permite concluir que o paredão possibilita uma maior proteção ao galgamento nos cenários E1C1 e E1C2. No entanto, importa ressaltar que para a configuração existente na praia Formosa, obra longitudinal aderente vertical com muro

defletor e praia frontal, estamos fora do âmbito de aplicação das fórmulas semi-empíricas e, por isso, os resultados devem ser considerados com alguma prudência.

4.3. *XGB-OVERTOPPING*

A ferramenta *XGB-Overtopping*, é uma rede neuronal desenvolvida pela Deltares para estimar o caudal médio de galgamentos em diversos tipos de estruturas costeiras. Através de 16 variáveis é possível obter uma estimativa do caudal médio de galgamento para essa estrutura e determinadas condições de onda [38]. Trata-se de uma implementação de *Machine Learning* em *Python* do tipo *gradient boosting decision trees,* que corresponde a uma árvore de decisão, também denominada de árvore de classificação e regressão por resolver problemas relacionados com a classificação, estimando uma etiqueta, e com a regressão, prevendo a quantidade [15].

Para a esquematização da estrutura são utilizadas as variáveis apresentas na Figura 4.2, sendo β o ângulo de ataque da onda relativamente à perpendicular da estrutura, h a profundidade de água à frente da estrutura, H_{m0} a altura de onda significativa do espectro na base da estrutura, $T_{m-1,0}$ o período de onda espectral médio na base da estrutura, h_t e B_t a profundidade e a largura da base da estrutura, γ os coeficientes de rugosidade, cot(α) os ângulos de inclinação, R_c o bordo livre (distância entre a cota de coroamento e o nível médio da superfície livre da água), B a largura da berma, h_b a profunidade da berma, tan(α) a inclinação da *foreshore*, Ac a distância entre a berma de coroamento da estrutura e o nível médio do mar e Gc a largura da berma de coroamento da estrutura.

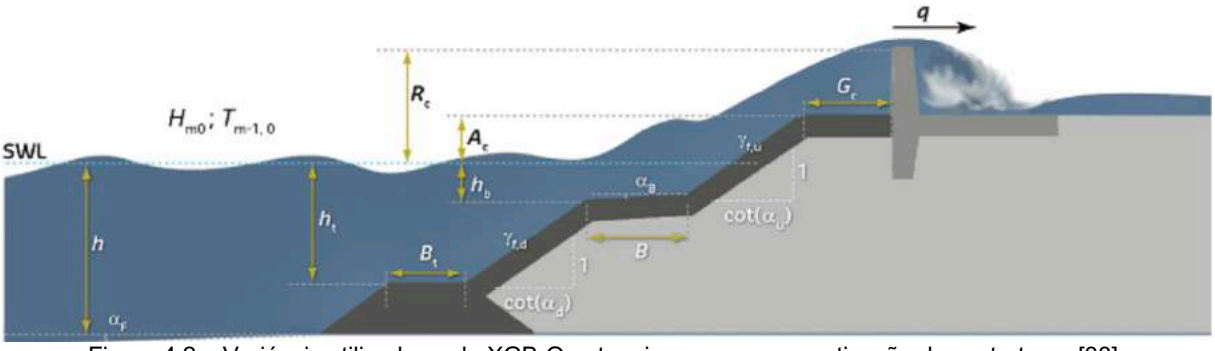


Figura 4.2 – Variáveis utilizadas pelo XGB-Overtopping para esquematização das estruturas [38].

Neste estudo foram analisados 4 esquematizações diferentes da estrutura, de condições extremas: o cenário atual de condições extremas (S1), a supressão da berma de coroamento (S2), a redução da distância entre a berma de coroamento da estrutura e do nível médio do mar (S3) e a combinação destes últimos 2 cenários (S4).

As variáveis de *input* utilizadas para cada cenário encontram-se na Tabela 4.5, sendo o *cot* α o ângulo de inclinação, γ o coeficiente de rugosidade e *tan* α o declive do litoral.

Tabela 4.5 - Variáveis de *input* utilizadas no *XBG-Overtopping*

	h [m]	H_{m0} [m]	$T_{m-1.0}$ [s]	h_t [m]	R_c [m]	A_c [m]	G_c [m]	cot α [-]	γ [-]	tan a [-]
Cenário 1	7.4	4.7	9.1	7.4	7.4	7.4	8.5	6	1	0.01
Cenário 2	7.4	4.7	9.1	7.4	7.4	7.4	**0.0**	6	1	0.01
Cenário 3	7.4	4.7	9.1	7.4	7.4	**5.4**	8.5	6	1	0.01
Cenário 4	7.4	4.7	9.1	7.4	7.4	**5.4**	**0.0**	6	1	0.01

Através destes cenários foi possível estimar que o caudal medio de galgamento, nas condições atuais da estrutura e para um evento de tempestade, será na ordem dos 4 l/s/m. Com uma subida do nível médio da água do mar de 50 cm esse caudal será na ordem dos 5 l/s/m.

4.4 SÍNTESE CONCLUSIVA

Tanto as fórmulas semi-empíricas, como a rede neuronal XBG-Overtopping, são ferramentas que auxiliam na estimativa dos caudais de galgamento médio. Embora adequadas para estruturas mais convencionais e semelhantes aquelas para as quais foram definidas, tem importantes limitações quando utilizadas em casos em que a configuração da estrutura é complexa e foge da configuração para a qual essas formulações foram derivadas. Este facto, justifica a grande variação entre as estimativas de caudal médio de galgamento.

Deste modo, os resultados apresentados neste capítulo devem ser considerados como estimativas aproximadas da possível ordem de grandeza do galgamento esperado. Essas estimativas devem ser confirmadas através de modelos numéricos e experimentais. Nesta dissertação, foi utilizado o modelo numérico XBeach.

5
ESTUDO NUMÉRICO

5.1. MODELO NUMÉRICO

De forma a analisar o galgamento costeiro que ocorre na Praia Formosa foi utilizado o modelo numérico *XBeach*. Trata-se de um modelo de código aberto criado para simular processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos nos diferentes tipos de costas. É limitado a curtos períodos de duração, como simulações de tempestades. Inclui processos hidrodinâmicos de transformação de ondas curtas (como refração, empolamento e rebentação), bem como de ondas longas (como propagação e dissipação) e processos morfodinâmicos como transporte de sedimentos, deslize do talude, alteração da batimetria e erosão localizada [39].

O modelo tem dois modos: hidrostático, onde é resolvida separadamente a variação da amplitude das ondas curtas relativamente às ondas longas, correntes e alterações morfológicas; e o não hidrostático, que resolve todos os processos, no entanto é mais exigente a nível computacional [40].

O modelo pode ser resolvido em três diferentes modelos de ondas: onda estacionária, *surfbeat* e não hidrostático. Será estudado apenas o *surfbeat*, módulo que analisa tanto as ondas curtas como as ondas longas em escala grupal, além de analisar a dinâmica morfológica da praia. Corresponde a um modo não estacionário e é válido para praias onde as ondas curtas são maioritariamente dissipadas quando estão próximo à linha de costa [41].

O software utiliza o balanço da ação de ondas curtas quando é implementado no modo não estacionário, dado pela Equação 12.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = \frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma} \qquad (12)$$

Sendo A a ação da onda; θ, o ângulo incidente relativamente ao eixo x; σ, a frequência intrínseca da onda; cx, cy e $c\theta$ são as velocidades de propagação da onda na direção x, y e θ, respetivamente; D_w, D_f e D_v correspondem à dissipação de energia por rebentação, pelo atrito com o fundo e pela vegetação, respetivamente.

A dissipação total da onda é distribuída proporcionalmente pelas direções das ondas segundo a Equação 13, sendo que no modo *surfbeat*, a dissipação total de energia da onda devido à sua rebentação é dada pela Equação 14 [39]. A dissipação de ondas curtas pela fricção com o fundo é dada pela Equação 15.

$$D_w(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{E_w(x, y, t)} \overline{D}_w(x, y, t) \qquad (13)$$

$$\overline{D}_w = 2 \frac{\alpha}{T_{rep}} Q_b E_w \qquad (14)$$

$$D_f = \frac{2}{3\pi}\rho f_w \left(\frac{\pi H_{rms}}{T_{m01}\sinh kh}\right)^3 \quad (15)$$

Onde S_w representa a densidade da energia da onda em cada componente direcional, E_w a energia da onda, $\overline{D}_w$ a dissipação total da onda, α o coeficiente de dissipação da onda, T_{rep} o período de onda representativo e Q_b a fração de ondas rebentadas, ρ a massa volúmica da água, f_w o coeficiente de atrito relativo às ondas curtas, H_{rms} a raíz média quadrática da altura de onda, T_{m01} o período médio intrínseco das ondas, k o número da onda e *h* a altura de onda local.

A turbulência à superfície da água induzida pela rebentação tem influência na dinâmica sedimentar, assim sendo, a variação da turbulência entre o fundo e a superfície da água também é considerada e é dada pela Equação 16 [39].

$$k_b = \frac{k}{\exp\left(\frac{h}{H_{rms}}\right) - 1} \quad (16)$$

Os *rollers* são representados como bolhas de água que deslizam a parede de uma onda e exercem uma tensão de cisalhamento na água abaixo de si, dada pela Equação 17.

$$\tau_{roller} = \frac{\rho g R}{\mathrm{L}}\beta_s \quad (17)$$

Em que R corresponde à área do *roller*, L ao comprimento de onda e β_s ao declive da parede da onda.

O software utiliza equações de ondas pouco profundas para ondas de baixa frequência e fluxos médios. Com base numa formulação de profundidade média, *Generalized Lagrangian Mean*, são utilizadas as Equações 18, 19 e 20.

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} = u^L\frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L\frac{\partial u^L}{\partial y} - fv^L - v_h\left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2}\right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} + \frac{F_{v,x}}{\rho h} \quad (18)$$

$$\frac{\partial v^L}{\partial t} = u^L\frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L\frac{\partial v^L}{\partial y} - fu^L - v_h\left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2}\right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} + \frac{F_{v,y}}{\rho h} \quad (19)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} = 0 \quad (20)$$

Sendo τ_{sx} e τ_{sy} as tensões de cisalhamento do vento, τ_{bx} e τ_{by} as tensões de cisalhamento do fundo, η o nível de água, F_x e F_y as tensões devido à ação das ondas, $F_{v,x}$ e $F_{v,y}$ as tensões induzidas pela vegetação, u^L e v^L as componentes direcionais da velocidade *Lagrangian*, v_h a viscosidade horizontal e *f* o coeficiente de Coriolis.

Relativamente ao transporte de sedimentos, é modelada a concentração de sedimentos na coluna de água, baseada na equação de equilíbrio de sedimentos, a Equação 21.

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hCu^E}{\partial x} + \frac{\partial hCv^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(D_h h\frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_h h\frac{\partial C}{\partial y}\right) = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s} \quad (21)$$

Em que C corresponde à concentração de sedimentos de profundidade média, D_h ao coeficiente de difusão do sedimento, C_{eq} à concentração de equilíbrio, u^E e v^E às componentes direcionais da velocidade Euleriana e T_s à resposta instantânea do sedimento.

Por sua vez, as Equações 22 e 23, equações de equilíbrio da concentração de sedimentos ou equações Soulsby-Van Rijn, são referentes à primeira formulação de transporte de sedimentos, que calcula separadamente o transporte de sedimentos no fundo, do à superfície da água.

$$C_{eq,b} = \frac{0.005h\left(\frac{D_{50}}{h\Delta g D_{50}}\right)^{1.2}}{h}\left(\sqrt{v_{mg}^2 + 0.018\frac{u_{rms,2}^2}{C_d}} - U_{cr}\right)^{2.4} \quad (22)$$

$$C_{eq,s} = \frac{0.012D_{50}\frac{(\left(\frac{\Delta g}{v^2}\right)^{1/3})^{-0.6}}{(\Delta g D_{50})^{1.2}}}{h}\left(\sqrt{v_{mg}^2 + 0.018\frac{u_{rms,2}^2}{C_d}} - U_{cr}\right)^{2.4} \quad (23)$$

Onde v_{mg} é a magnitude da velocidade, $u_{rms,2}$ a velocidade orbital com inclusão da turbulência derivada às ondas curtas, C_d o coeficiente de arrasto e U_{cr} a velocidade crítica. A velocidade crítica define a que profundidade a velocidade média do transporte de sedimento é iniciada e é dada pela Equação 24.

$$U_{cr} = \begin{cases} 0.19D_{50}^{0.1}log10\left(\frac{4h}{D_{90}}\right) \; for \; D_{50} \leq 0.0005 \\ 8.5D_{50}^{0.6}log10\left(\frac{4h}{D_{90}}\right) \; for \; D_{50} > 0.05 \end{cases} \quad (24)$$

Tal como qualquer modelo numérico, o *XBeach* tem condições fronteira, que no caso se aplicam relativamente às ondas, às equações de águas pouco profundas e ao transporte de sedimentos [39].

O modelo corre através do ficheiro executável *XBeach.exe*, que por sua vez lê o ficheiro *params.txt* que inclui informação sobre a grelha, batimetria, e todos os inputs necessários. Este ficheiro pode também fazer referência a outros ficheiros que contêm informação adicional necessária.

5.2. *IMPLEMENTAÇÃO* DO MODELO NUMÉRICO

5.2.1. DADOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Para a implementação do modelo numérico foi necessário reunir diversos dados referentes à zona da Praia Formosa.

As condições marítimas foram determinadas segundo a boia-ondógrafo do Funchal, do Instituto Hidrográfico (IH) gerida pela Administração dos Portos da Região Autónoma da Madeira (APRAM) como apresentado em capítulos anteriores. Daí foi possível obter valores da altura significativa, do período de pico e da direção da propagação da ondulação. As tabelas de marés foram disponibilizadas pelo IH.

Para a criação da batimetria a aplicar no modelo foram utilizados dados em conformidade de levantamentos topográficos e batimétricos realizados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pela APRAM e pelo IH.

Os dados da estrutura de proteção e da morfologia da praia foram obtidos através de relatórios da Direção Regional do Ambiente e Alterações Climáticas da Região Autónoma da Madeira (DRAAC – RAM) e de estudos do LNEC.

5.2.2. INPUTS

Para correr o modelo é utilizada uma pasta com os ficheiros que são apresentados na Figura 5.1. É indispensável o ficheiro executável do *XBeach* e os ficheiros de *input* criados. Na mesma pasta encontram-se ficheiros do próprio *software*.

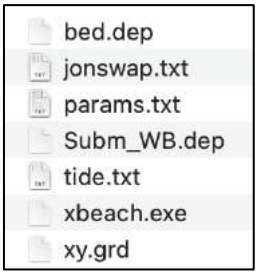


Figura 5.1 – Ficheiros de *input*.

Para a implementação do modelo foi necessário criar vários ficheiros de *input* com os devidos parâmetros. Foram criados três ficheiros de texto (*params*, *jonswap* e *tide*), dois ficheiros de profundidade (*bed* e *Subm_WB*) e um ficheiro de grelha (*xy*).

Os ficheiros de texto foram determinados segundo o Manual *XBeach*, de acordo com as condições da Praia Formosa e os ficheiros da grelha e batimetria foram obtidos através do *Delft3D*, modelo disponível em código aberto que permite simular processos hidrodinâmicos e morfológicos costeiros.

5.2.2.1. Grelha e Batimetria

A grelha e a batimetria foram executadas com uma ligeira rotação, de forma a estarem alinhadas com o eixo *xy*, para estarem em conformidade com o processamento do *XBeach*. A grelha indica as coordenadas enquanto a batimetria indica a profundidade a que essas se encontram.

A criação da grelha foi realizada através do *Delft3D-RGFGRID*, esta é criada com forma retangular e com espaçamentos variáveis a partir do ponto de origem (3458267, 1088870). Tendo em consideração que quanto menor é o espaçamento entre os pontos, mais detalhada e demorada é a simulação, é realizado um refinamento local da grelha apenas junto à costa, para melhorar a resolução nessa zona e obter uma maior eficiência nos processos de transformação de onda. Assim é possível obter a grelha necessária para o modelo numérico, apresentada na Figura 5.2.

Por sua vez, a batimetria necessária pode ser obtida por meio do *Delft3D-QUICKIN* por interpolação da batimetria em formato *xyz* com a grelha obtida anteriormente. Para isso, é criado um polígono a incluir toda a área com a batimetria, é realizada uma interpolação triangular e uma difusão interna para ajustar possíveis falhas ocorridas. Na zona mais *offshore* é utilizada uma batimetria fictícia de -20 m e entre estas duas (entre os -20 e os -15 m) é realizada uma difusão interna para formar uma rampa, como mostra a Figura 5.2, e assim completar a batimetria necessária. Deste modo, é possível extrair a batimetria em formato *dep*, que contém a profundidade de água para cada célula da grelha.

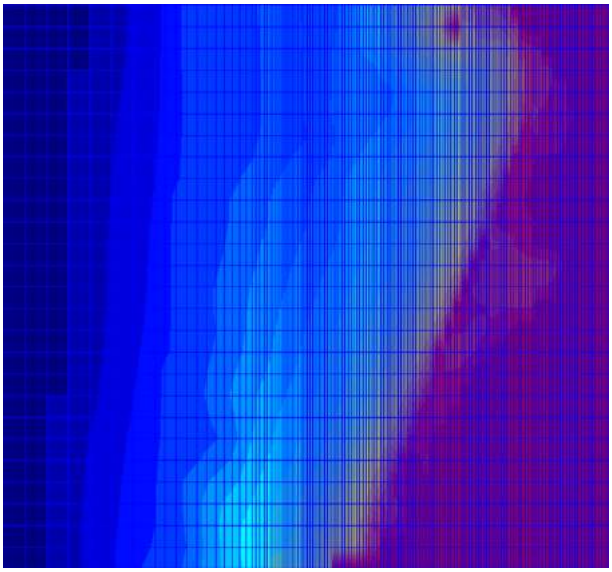


Figura 5.2 - Grelha e batimetria obtidas a partir do *Delft3D*.

Com o objetivo de melhorar a simulação, também foi criada uma camada não erodível através da criação de um ficheiro em formato de profundidade (*Subm_WB*) que consiste em diferenciar a zona superficial, ou seja, a zona no tardoz da obra longitudinal aderente (0 m), da restante zona costeira que predomina fundo arenoso (considerada arbitrariamente igual a 20 m). Este ficheiro carateriza a morfologia do domínio indicando a espessura da camada que pode ser erodida, daí considerar-se que a zona que é protegida pelo paredão, tem uma espessura erodível nula.

5.2.2.2. Ficheiros de Texto

Para a implementação do modelo, utilizou-se três ficheiros de texto onde são discriminados os parâmetros necessários para correr o modelo.

O ficheiro *tide* refere-se às marés e foi aplicado considerando a variação das marés segundo o tempo de duração da tempestade em análise.

O ficheiro *jonswap* inclui a altura de onda significativa, o período de pico, o principal ângulo da onda, a duração e outros parâmetros predefinidos para uma dada tempestade. Considerou-se que o ângulo da onda era sempre o mesmo, tendo em consideração que a grande maioria das ondas se aproximam perpendicularmente à costa.

O ficheiro *params* contém a informação referente à grelha, batimetria e todos os *inputs* necessários. Estes podem referir já os valores reais ou podem referenciar outro arquivo com informação adicional ao modelo. Além dos parâmetros de *input* considerados no ficheiro, também são referenciados os parâmetros de *output* desejados, que posteriormente são processados na modelação do *XBeach*. No Anexo B está representado um modelo do ficheiro *params* utilizado no presente estudo.

5.2.3. *OUTPUTS*

Como *outputs* foram escolhidos três parâmetros: altura média das ondas *(H*), cota do fundo (*zb*) e sedimentação/erosão cumulativa (*sedero*). Através da simulação realizada foram obtidos dados referentes a estes *outputs* que, com recurso ao *Delft3D*, módulo *QUICKPLOT*, possibilitaram a análise de resultados.

5.3. CONDIÇÕES DE TESTE

De forma a analisar a situação atual da Praia Formosa realizaram-se três simulações de diferentes tempestades. Foram selecionados os três períodos aparentemente mais críticos entre 1996 e 2021 com um tempo de duração de simulação de 12h:

- Simulação 1 – 5 de dezembro de 2010 das 9h às 21h
- Simulação 2 – 5 de março de 2013 das 0h às 12h
- Simulação 3 – 28 de fevereiro de 2018 das 2h às 14h

Para cada simulação, foram utilizadas as alturas de onda significativas, os períodos de pico e os níveis de marés apresentados na Tabela 5. Estes valores foram obtidos em intervalos de 30 minutos.

Tabela 5.1 - Condições de onda e maré analisadas para cada simulação

Simulação 1			Simulação 2			Simulação 3		
H_{m0}	T_p	Maré	H_{m0}	T_p	Maré	H_{m0}	T_p	Maré
4.37	10.0	-0.635	5.20	13.3	-0.441	4.73	10.5	0.693
4.79	10.0	-0.428	4.90	13.3	-0.499	4.49	9.1	0.506
5.10	10.0	-0.194	5.09	13.3	-0.527	4.63	9.1	0.288
5.23	11.1	0.053	5.27	14.3	-0.524	4.52	15.4	0.053
5.22	10.0	0.295	5.21	13.3	-0.491	4.57	10.5	-0.184
5.63	10.5	0.518	4.84	14.3	-0.429	4.43	10.5	-0.409
5.37	12.5	0.707	5.57	14.3	-0.344	4.52	10.0	-0.607
5.28	11.1	0.849	4.83	13.3	-0.240	4.24	11.1	-0.767
5.33	13.3	0.934	5.18	13.3	-0.122	4.56	10.0	-0.879
5.91	10.0	0.956	5.55	14.3	0.003	4.46	11.1	-0.937
5.77	11.8	0.912	5.58	14.3	0.128	4.59	9.1	-0.936
5.71	11.1	0.806	5.40	13.3	0.245	4.70	15.4	-0.879
5.40	12.5	0.645	4.90	14.3	0.347	4.62	9.1	-0.767
4.89	11.1	0.439	5.23	13.3	0.427	5.04	9.1	-0.608
4.89	11.1	0.204	5.06	14.3	0.481	5.24	9.1	-0.412
4.78	10.5	-0.046	4.66	13.3	0.503	5.31	9.1	-0.191
4.99	12.5	-0.294	5.04	13.3	0.494	5.33	10.0	0.042
4.45	10.0	-0.521	5.17	14.3	0.452	5.35	10.5	0.270
4.92	13.3	-0.714	4.88	14.3	0.382	5.51	11.8	0.480
4.93	14.3	-0.861	5.01	14.3	0.289	5.08	11.1	0.658
4.85	11.1	-0.952	5.33	14.3	0.178	4.99	10.5	0.790
4.63	10.0	-0.981	5.03	14.3	0.058	5.11	10.5	0.869
5.10	12.5	-0.947	4.66	12.5	-0.065	4.88	11.1	0.889
4.61	12.5	-0.853	4.69	13.3	-0.181	5.42	10.0	0.847
5.47	13.3	-0.703	4.27	14.3	-0.285	5.09	11.8	0.747

Selecionou-se a tempestade de 5 de março de 2013 para simular possíveis situações futuras:

- Simulação 4 – análise do efeito da subida do nível médio do mar em 0.5 m, devido aos efeitos provocados pelas alterações climáticas
- Simulação 5 – alimentação artificial da praia em cerca de 100 000 m^3
- Simulação 6 – implementação de uma barra submersa

Na simulação 4, a batimetria permanece igual às simulações anteriores, no entanto o ficheiro de marés aumenta o seu valor em 0.5 m. Na simulação 5 a batimetria é alterada, há uma diminuição da profundidade na zona de alimentação. Por sua vez, na simulação 6, é modificada a batimetria na zona da barra e também é alterada a camada não erodível, a zona da barra também é considerada não erodível (0 m). Na Figura 5.3 é apresentado o esboço das alternativas analisadas, estando representado a azul o talude atual da praia e a verde as alternativas simuladas.

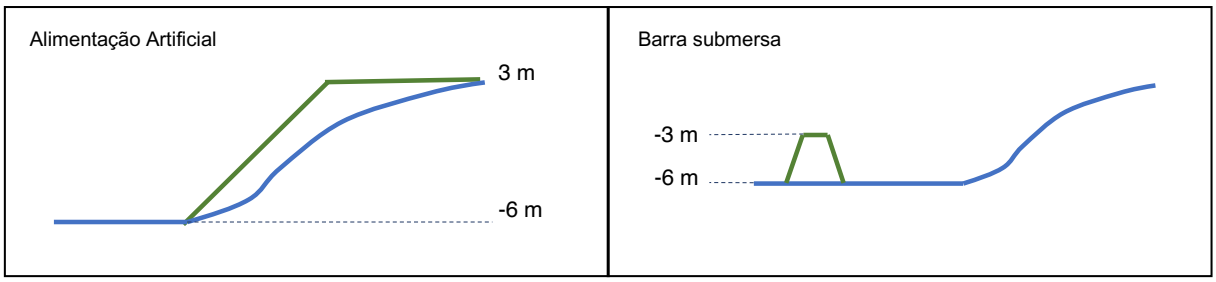


Figura 5.3 – Esboço da alimentação artificial (esquerda) e da barra submersa (direita).

Para a determinação do caudal de galgamento que ocorre em cada uma das simulações foram utilizadas 4 sondas ao longo da linha de costa, dispostas como apresenta a Figura 5.4.

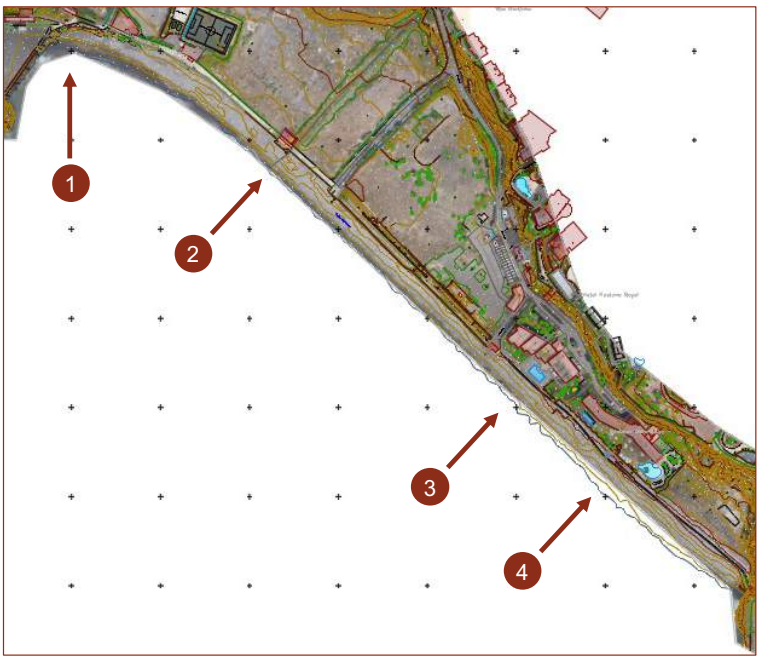


Figura 5.4 – Disposição das sondas ao longo da linha de costa.

5.4. ANÁLISE DE RESULTADOS

5.4.1. SIMULAÇÃO 1

Ao longo do dia 5 de dezembro de 2010 foram observados vários galgamentos costeiros na Praia Formosa. Na Figura 5.5 encontram-se dois momentos de maior intensidade, onde ocorreu um maior caudal de galgamento, os dois com a maré a começar a vazar, no entanto com elevado nível de água devido às marés vivas. O maior caudal de galgamento apresentado graficamente deu-se quando se verificou uma altura de onda significativa de 5.77 m, com um período de 11.8 s e com a maré a começar a baixar.

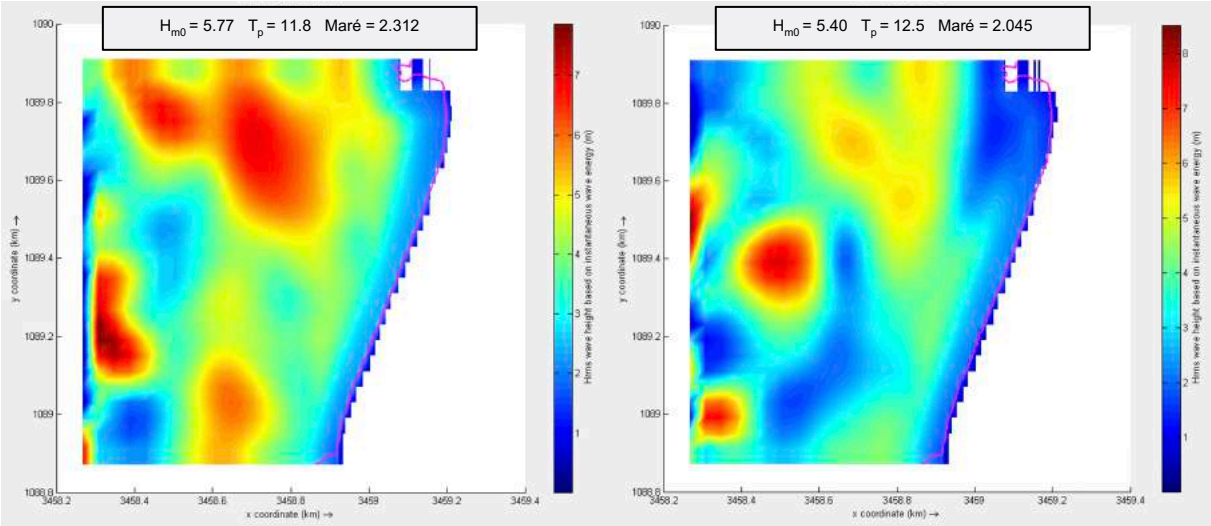


Figura 5.5 - Gráficos das alturas de onda em distintos momentos da tempestade de 5 de dezembro de 2010.

Os caudais máximos apresentados em cada sonda foram de 5.58, 5.17, 5.99, 6.43 l/s/m, o que demonstra que os maiores caudais foram observados na extremidade Este da praia, embora sejam todos valores muito próximos entre si. Os caudais ocorridos nesta tempestade são apresentados na Figura 5.6, onde são observados maiores valores entre as 11h30 e as 15h, coincidente com a altura de maior maré.

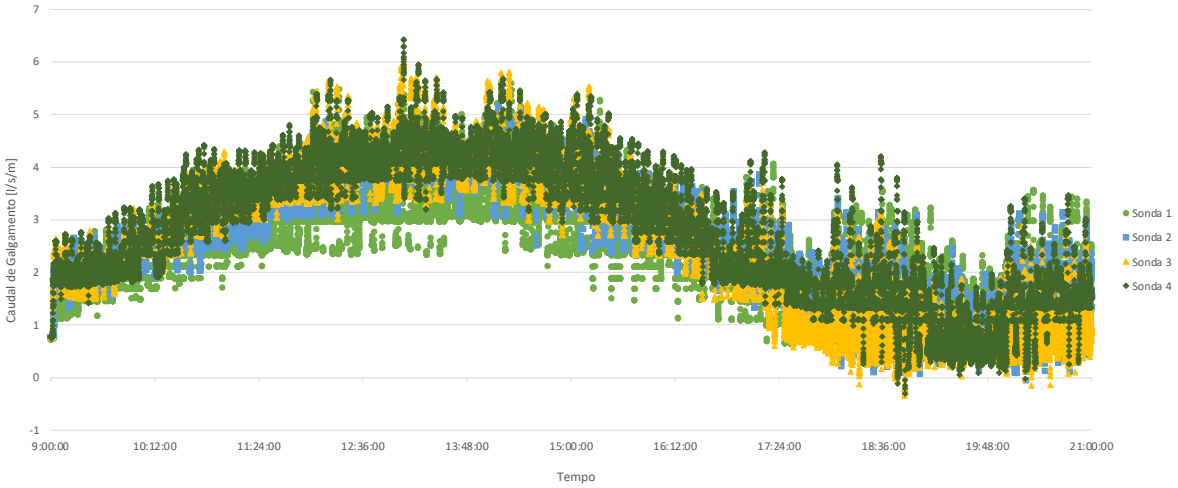


Figura 5.6 – Caudais de galgamento observados durante a tempestade de 5 de dezembro de 2010, para cada sonda.

Na Figura 5.7 encontra-se a evolução da cota de fundo no desenrolar da tempestade, onde é possível verificar as mudanças morfológicas que decorrem. Próximo à linha de costa há uma diminuição da cota de fundo à medida que a tempestade se desenvolve, independentemente da maré, o que significa que ocorreu um maior transporte de sedimentos na zona de rebentação e espraiamento, quando comparando com toda a zona costeira.

É de notar que próximo ao Ilhéu da Praia Formosa (lado W da praia) há uma acumulação significativa e progressiva de sedimentos, podendo ser explicada pela proteção que o pontão e o Ilhéu fornecem, protegendo também de correntes marítimas, no entanto, no último gráfico já se percebe uma leve dispersão dos mesmos. De frente para o Ilhéu a cota de fundo também diminui, por estar diretamente vulnerável à agitação marítima e às correntes envolventes.

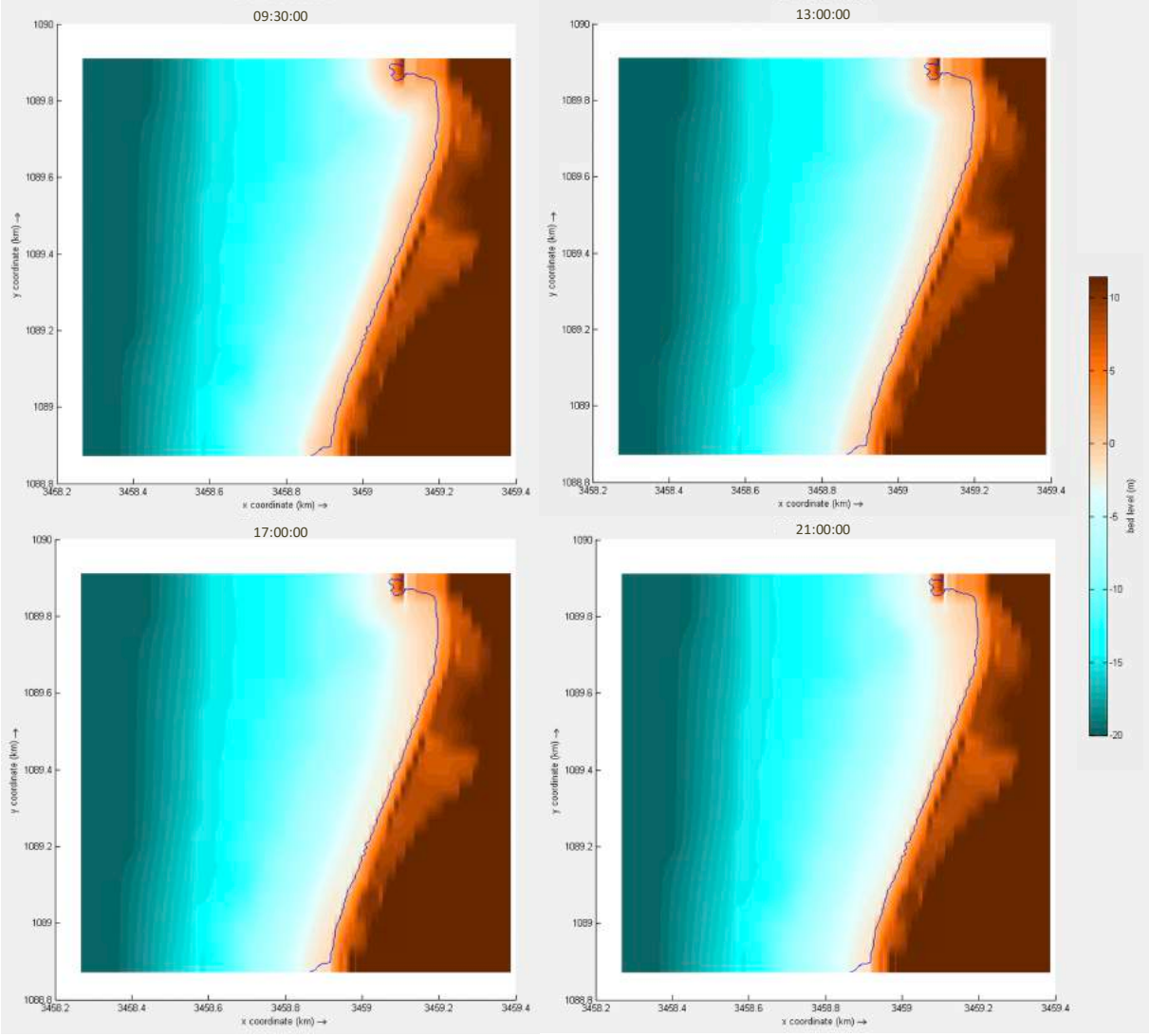


Figura 5.7 - Gráficos da evolução da cota de fundo durante a tempestade de 5 de dezembro de 2010.

Em concordância com a figura anterior, a Figura 5.8 apresenta uma acumulação de sedimentos na extremidade W e erosão em toda a extensão da linha de costa. É observado um significativo movimento sedimentar próximo à zona de rebentação e na própria zona de espraiamento. Esta movimentação dá a

entender que há uma forte rebentação que provoca não só galgamentos costeiros, mas também erosão da praia e das estruturas adjacentes.

No decorrer da tempestade os sedimentos deslocam-se em direção ao mar, havendo certa acumulação próximo à zona de rebentação e espraiamento, no entanto, com o passar da tempestade estes sedimentos dispersam-se e predomina a erosão na linha costeira, principalmente no lado Este.

De frente ao Ilhéu da Praia Formosa também é observada erosão. A forte agitação marítima faz as ondas dissiparem a sua energia quando se deparam com a aproximação ao Ilhéu, provocando galgamentos ao mesmo e promovendo a sua erosão.

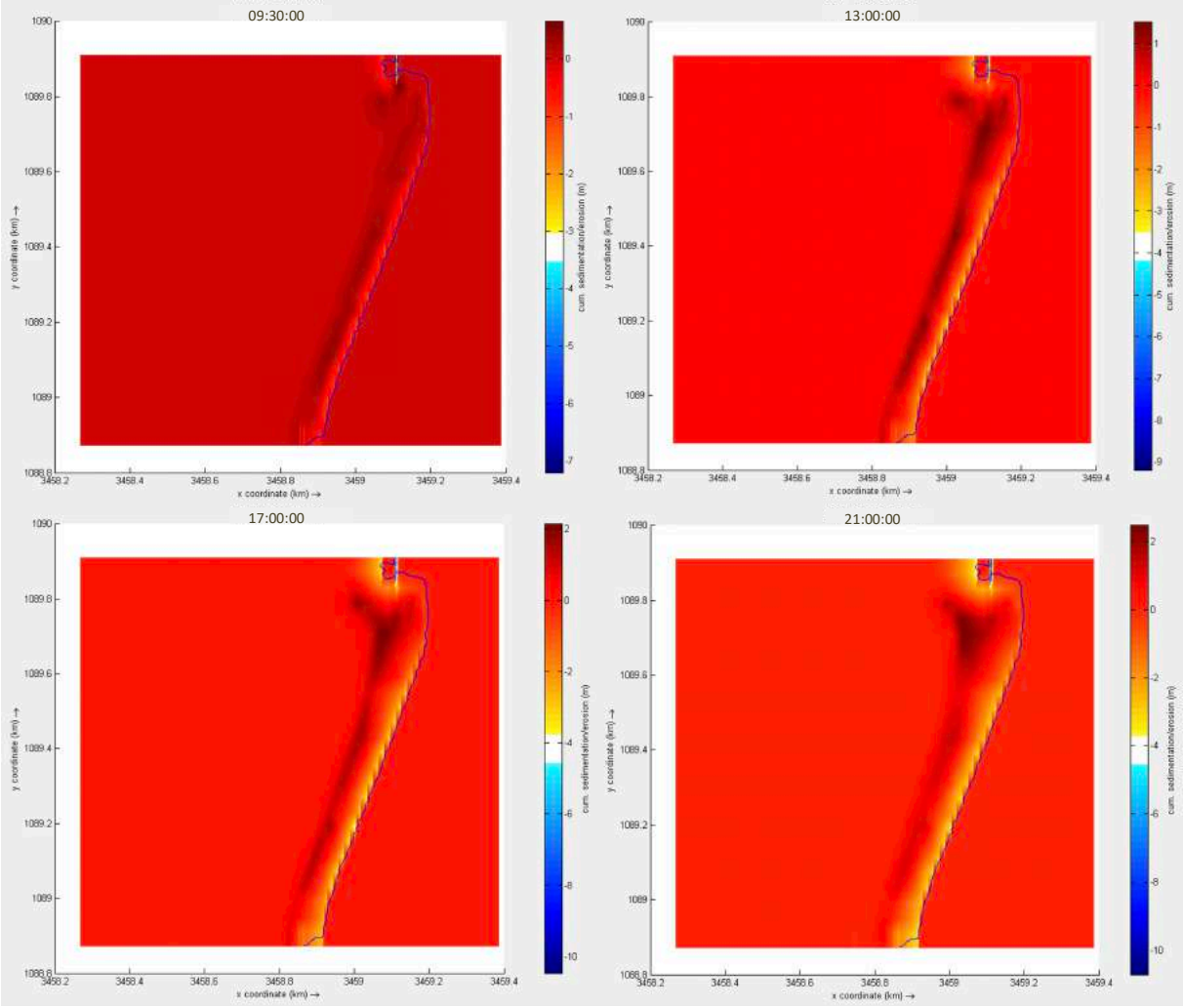


Figura 5.8 – Movimento sedimentar durante a tempestade de 5 de dezembro de 2010.

5.4.2. SIMULAÇÃO 2

Como mostra a Figura 5.9, houve galgamentos muito significativos durante a tempestade do dia 5 de março de 2013. Estão representadas duas circunstâncias onde estes galgamentos tiveram uma elevada significância, atingindo principalmente a zona central e o lado Este da praia. Os maiores caudais de galgamento foram observados com a maré a vazar e com períodos de pico elevados.

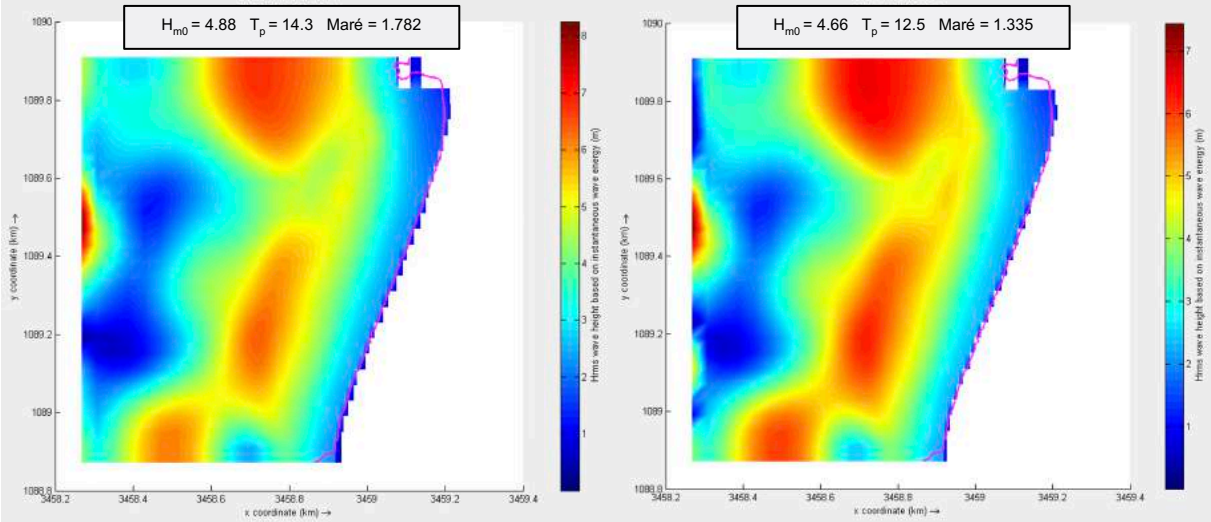


Figura 5.9 - Gráficos das alturas de onda em distintos momentos da tempestade de 5 de março de 2013.

Os caudais máximos apresentados em cada sonda foram de 5.53, 5.03, 5.59, 5.87 l/s/m. Tal como na simulação 1, os maiores caudais deram-se na extremidade Este da praia, continuando a ser valores muito próximos. Na Figura 5.10 encontram-se os valores dos galgamentos que ocorreram durante a simulação 2, notou-se o progressivo aumento de galgamentos com a subida da maré.



Figura 5.10 – Caudais de galgamento observados durante a tempestade de 5 de março de 2013, para cada sonda.

Pela Figura 5.11 é visível a evolução da cota de fundo durante a tempestade de 5 de março de 2013. Ocorreram mudanças morfológicas, tendo se observado uma redução da cota de fundo ao longo de toda a extensão da praia, com exceção do canto W, onde ocorre um aumento do nível de fundo devido à acumulação de sedimentos que se observa no local.

Contudo, nos últimos momentos da tempestade verifica-se que a acumulação de sedimentos começa a diminuir e o nível de fundo começa a ser levemente e progressivamente reduzido. Esta acumulação de sedimentos cresce no decorrer da tempestade e começa a se prolongar para Este até que, por fim, começa

a se dispersar. Tal como visto na simulação anterior, este acontecimento é causado pela existência do pontão, do Ilhéu da Praia Formosa e de correntes marítimas.

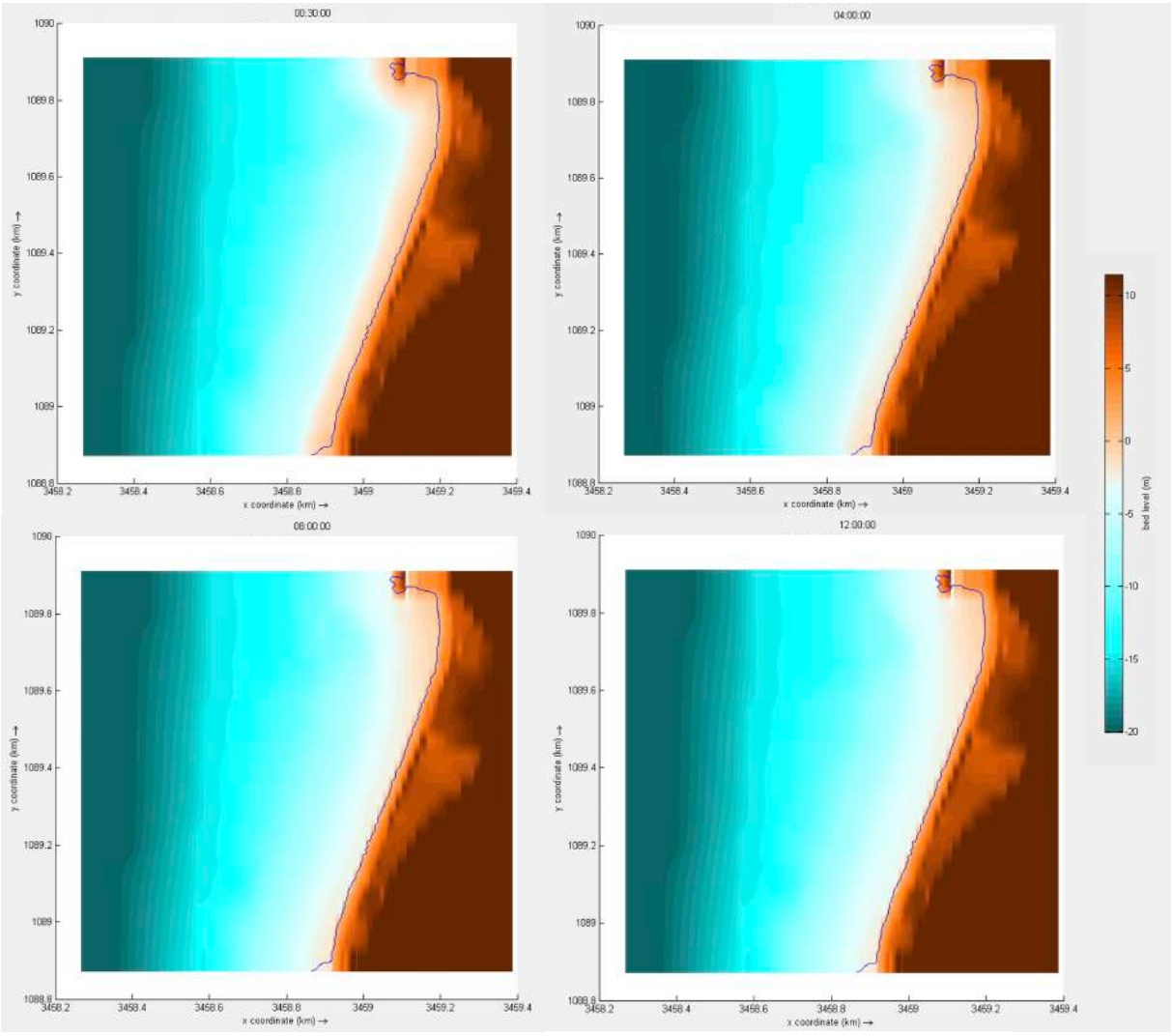


Figura 5.11 - Gráficos da evolução da cota de fundo durante a tempestade de 5 de março de 2013.

A Figura 5.12 apresenta os movimentos sedimentares que ocorreram nessa data. Verificou-se uma grande movimentação de sedimentos não só na zona de rebentação, mas também na zona de espraiamento e mesmo anteriormente à rebentação.

A elevada agitação proporciona a movimentação de sedimentos, gerando erosão em certas zonas da praia, especialmente a Este. Os galgamentos que ocorrem promovem esta erosão e causam danos nas estruturas próximas, como é o caso dos paredões de proteção, do próprio passeio marítimo e das estruturas hoteleiras que lá se encontram.

A Oeste, tal como se observou na tempestade anterior, há uma acumulação de sedimentos que posteriormente tende a reduzir. Os sedimentos que se depositam próximo da zona de rebentação tendem a se dissipar e a linha de costa tende a ser erodida.

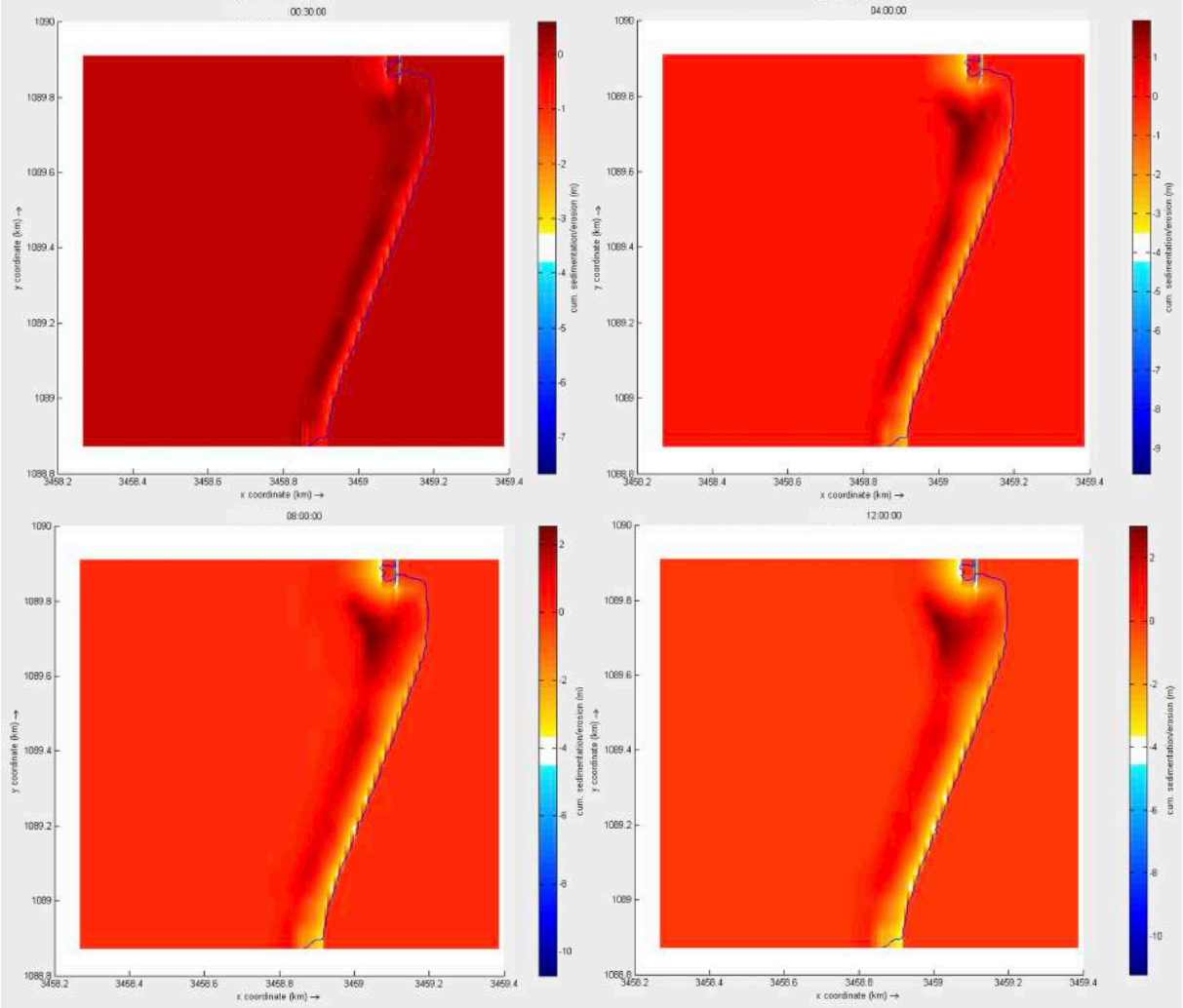


Figura 5.12 - Movimento sedimentar durante a tempestade de 5 de março de 2013.

5.4.3. SIMULAÇÃO 3

Durante a tempestade que ocorreu no dia 28 de fevereiro de 2018 também foram registados galgamentos costeiros significativos. Dois momentos desta tempestade estão representados na Figura 5.13, onde através da altura de onda apresentada, é possível verificar a ocorrência de galgamentos. Os maiores galgamentos apresentados deram-se com a maré a subir.

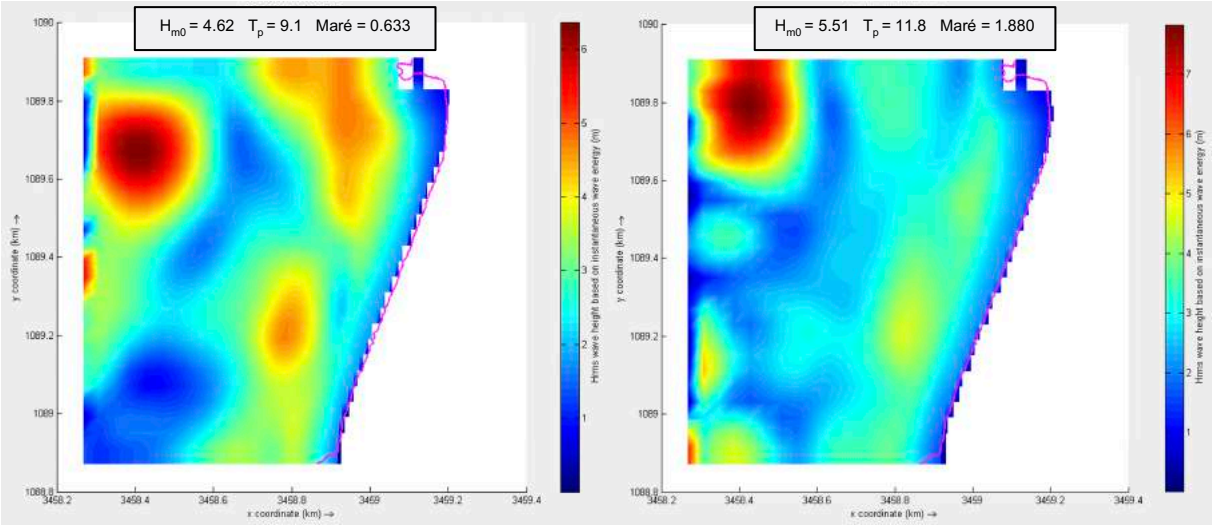


Figura 5.13 - Gráficos das alturas de onda em distintos momentos da tempestade de 28 de fevereiro de 2018.

Tal como nas simulações anteriores, os maiores galgamentos costeiros foram observados a Este da praia. As sondas 1 a 4 apresentaram valores de 4.99, 4.65, 5.26 e 5.32 l/s/m, respetivamente. Os caudais de galgamento observados encontram-se representados na Figura 5.14, verificou-se um progressivo aumento de galgamentos com a subida da maré, no entanto, houve breves momentos com um galgamento superior ao esperado, como por exemplo, perto das 8h.

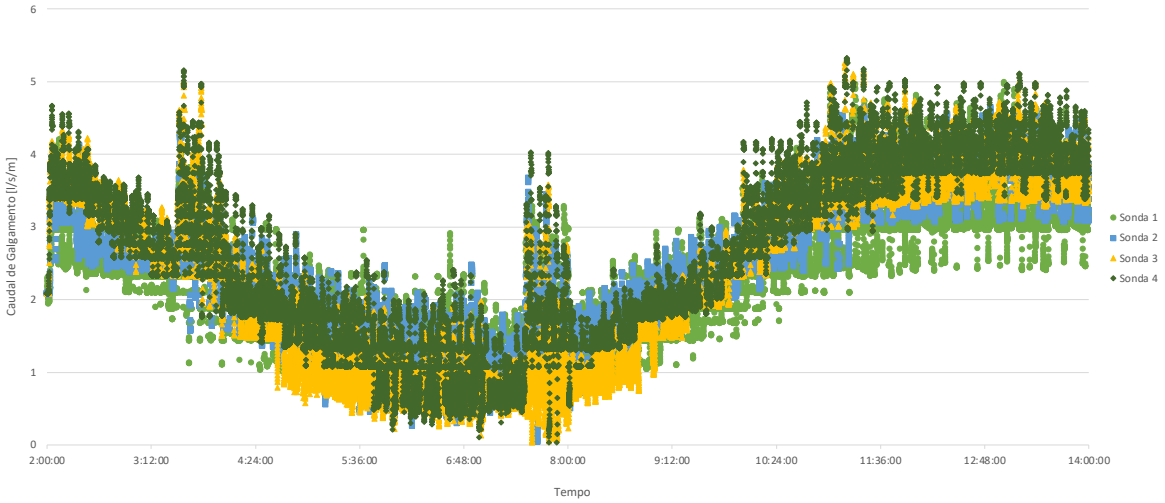


Figura 5.14 – Caudais de galgamento observados durante a tempestade de 5 de março de 2013, para cada sonda.

Na Figura 5.15 é apresentada a evolução da cota de fundo durante a terceira tempestade simulada. As mudanças morfológicas que ocorreram são semelhantes às tempestades anteriormente analisadas, dado que ocorre uma redução de sedimentos ao longo da praia, sendo que a Oeste ocorre um aumento de nível de fundo a tender para Este, seguido da progressiva dispersão dos sedimentos.

A extremidade Este continua a ser a zona com maior redução do nível de fundo, bem como a zona à frente do Ilhéu da Praia Formosa, por estar mais exposta à agitação e às correntes marítimas.

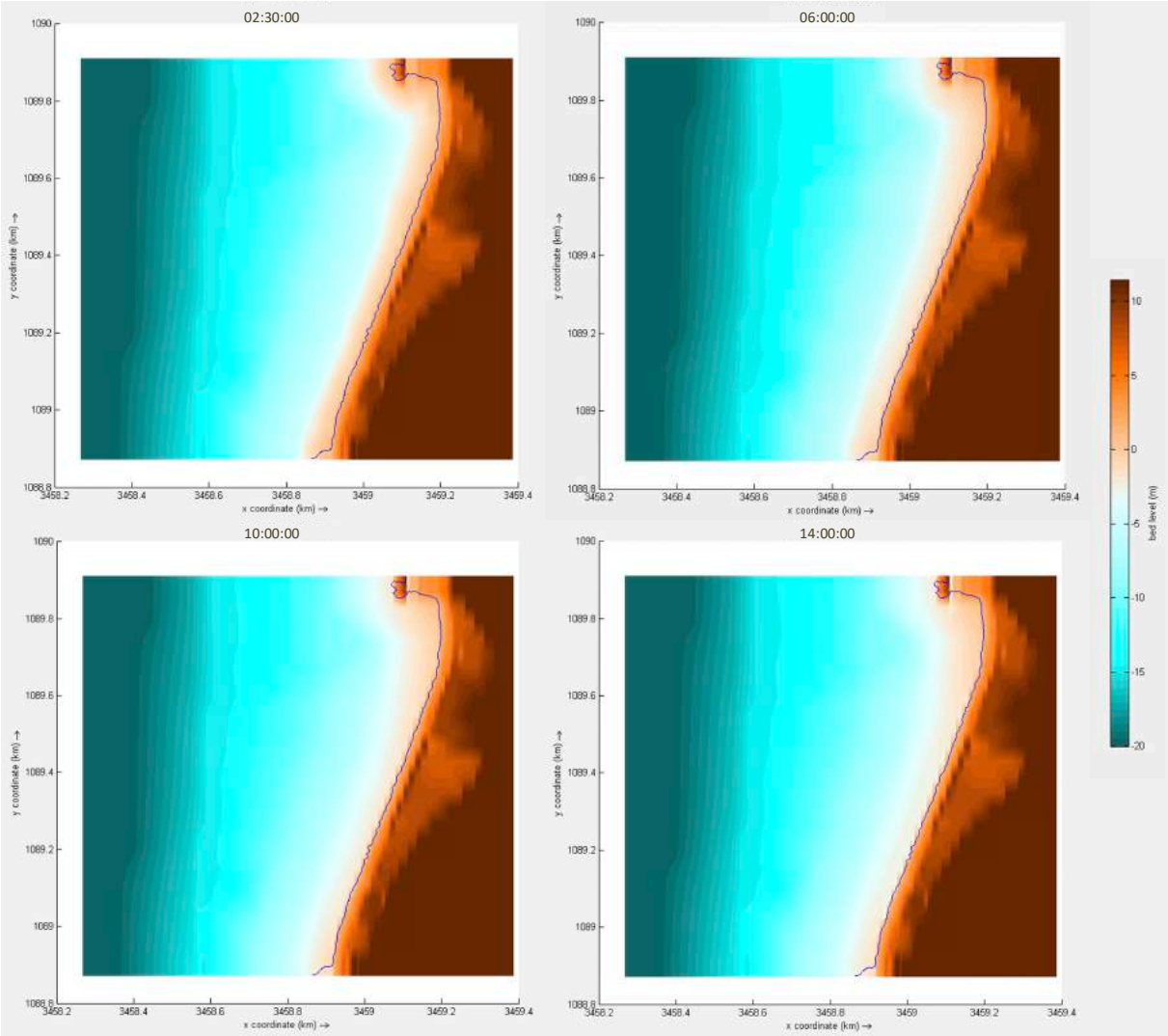


Figura 5.15 - Gráficos da evolução da cota de fundo durante a tempestade de 28 de fevereiro de 2018.

Os movimentos sedimentares que ocorreram encontram-se representados na Figura 5.16. Constata-se que houve movimentos significativos, principalmente na zona próxima à rebentação e espraiamento, com ênfase na erosão ao longo de toda a linha de costa da praia e de frente para o Ilhéu.

No decorrer da tempestade ocorre uma acumulação de sedimentos em toda a extensão da praia e relativamente afastada da linha de costa, no entanto, esta acumulação tende a se dispersar com o passar do tempo. Os sedimentos que se encontravam ao largo da linha de costa tendem em direção ao mar, o que promove a erosão de toda a linha de costa, especialmente na extremidade Este e à frente do Ilhéu.

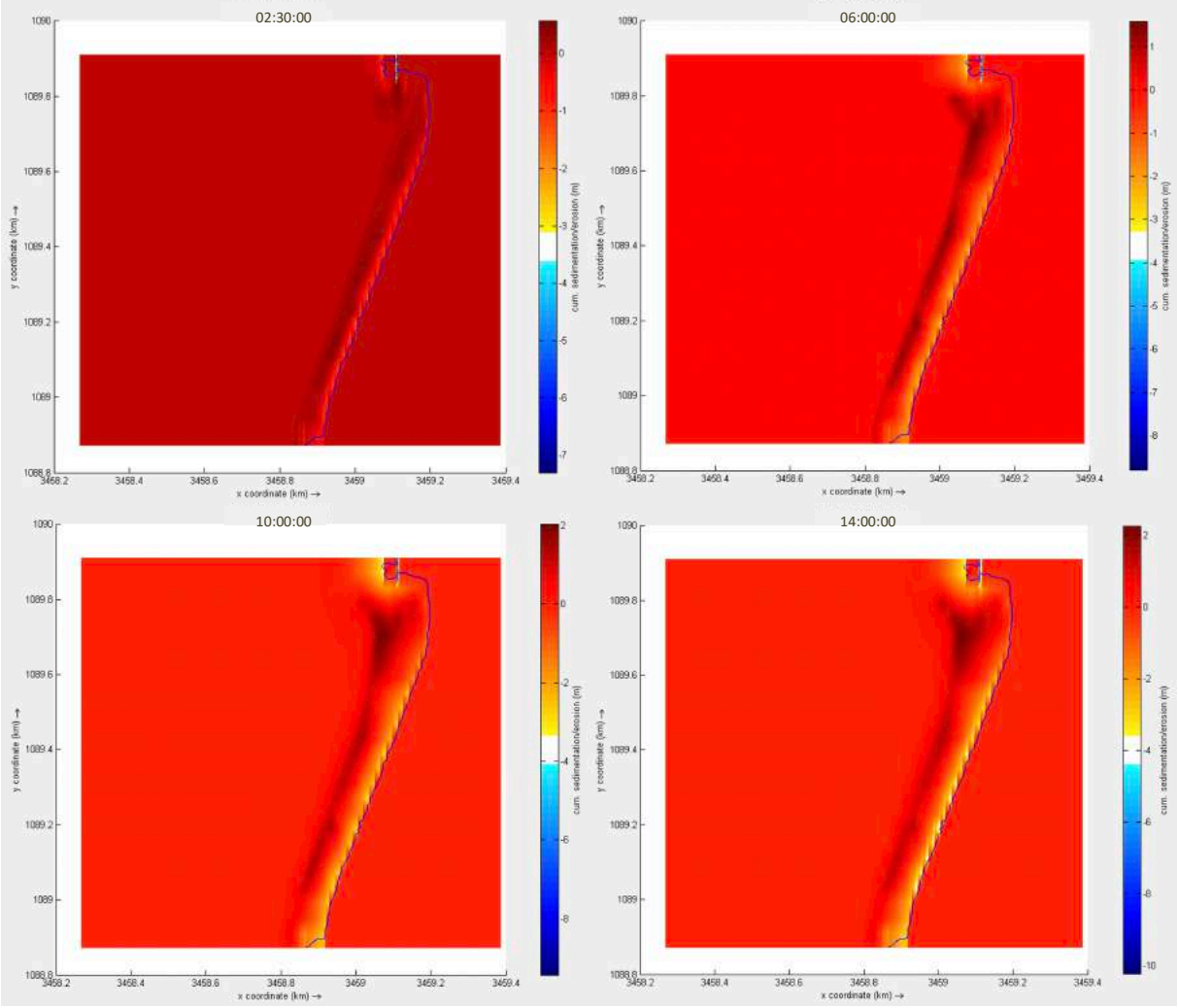


Figura 5.16 - Movimento sedimentar durante a tempestade de 28 de fevereiro de 2018.

5.4.4. Análise Da Situação Atual

Apesar de em condições de agitação marítima normal a própria costa e as estruturas de proteção serem suficientes para o não surgimento de galgamentos costeiros, em condição de tempestade já não se verifica o mesmo.

Observou-se que os maiores galgamentos ocorrem quando há períodos de onda mais elevados e alturas de onda significativa superiores a 4 m. Sabe-se que na data da simulação 1 (5 de dezembro de 2010) era lua nova e na simulação 3 (28 de fevereiro de 2018) era quase lua cheia, o que significa que o sol e a lua encontravam-se alinhadas com a Terra, ocorrendo assim as chamadas marés vivas, que favorecem a ocorrência de galgamentos costeiros devido à maior amplitude das marés. A simulação 2 (5 de março de 2013) já não teve esta influência pois encontrava-se em quarto minguante, havendo menores amplitudes de maré.

Na Tabela 5.2 são apresentados os valores máximos de galgamento em cada sonda, para cada uma das simulações de tempestade, considerando as condições atuais.

Tabela 5.2 – Galgamento máximo obtido em cada sonda, para cada simulação de tempestade nas condições atuais

Galgamento máximo [l/s/m]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4
Simulação 1	5.58	5.17	5.99	6.43
Simulação 2	5.53	5.03	5.59	5.87
Simulação 3	4.99	4.65	5.26	5.32

Entre as tempestades analisadas, a tempestade de 2010 apresentou maiores galgamentos, seguida da tempestade de 2013 e, por fim, a de 2018. Por sua vez, a sonda 4 obtém maiores caudais, seguida da 3, 1 e 2. Apesar de todas as tempestades apresentarem caudais de galgamento relativamente semelhantes, os maiores galgamentos são dados na extremidade Este da praia.

As zonas Este e central da praia são mais vulneráveis à agitação marítima, sendo assim, mais vulneráveis aos galgamentos costeiros. A extremidade Oeste da praia não é tão vulnerável aos galgamentos devido à proteção que recebe do Ilhéu e do pontão que delimitam a praia, contudo, o próprio Ilhéu é alvo de significativa erosão e galgamentos, uma vez que tem uma saliência de cerca de 100 m em relação à linha de costa.

Verifica-se que a cota de fundo tende a diminuir com o passar da tempestade. Na extremidade W ocorre uma acumulação de sedimentos que, com o tempo, tende a se dissipar. Na extremidade Este e de frente ao Ilhéu a cota de fundo sofre uma redução, faz-se sentir uma forte erosão.

Durante a tempestade os sedimentos afastam-se da linha de costa e deslocam-se em direção ao mar, acumulando-se principalmente na zona próxima à rebentação e na zona de espraiamento. Isto provoca o aumento da erosão junto à linha de costa, em toda a extensão da praia. Posteriormente, com o passar da tempestade, estes sedimentos tendem a se dissipar e assim, fica a predominar a erosão.

A erosão predomina na extremidade Este e mais intensamente à frente do Ilhéu da Praia Formosa. Por serem zonas mais expostas à forte agitação marítima e às correntes marítimas, são mais vulneráveis à erosão e aos galgamentos costeiros.

Ao longo dos anos analisados (1996-2021) são observados eventos deste calibre, uns mais intensos que outros, contudo, muitos galgamentos costeiros são verificados. Por essa razão é de grande importância aprofundar o estudo da morfologia e dinâmica da praia, de forma a arranjar alternativas que melhorem, reduzam estas ocorrências, que são cada vez mais recorrentes.

5.4.5. Simulação 4

Com a subida de 0.5 m do nível médio da água do mar, a praia fica mais vulnerável a galgamentos costeiros. Na Figura 5.17 é apresentada a comparação entre as alturas de onda da tempestade ocorrida no dia 5 de março de 2013, considerando as condições atuais e a subida de 0.5 m do nível médio do mar.

Devido à subida do nível médio do mar, a maré passa a ter valores superiores, o que provoca um aumento de altura de onda junto à costa. Esta subida promove o aumento da intensidade e quantidade dos galgamentos costeiros em toda a praia.

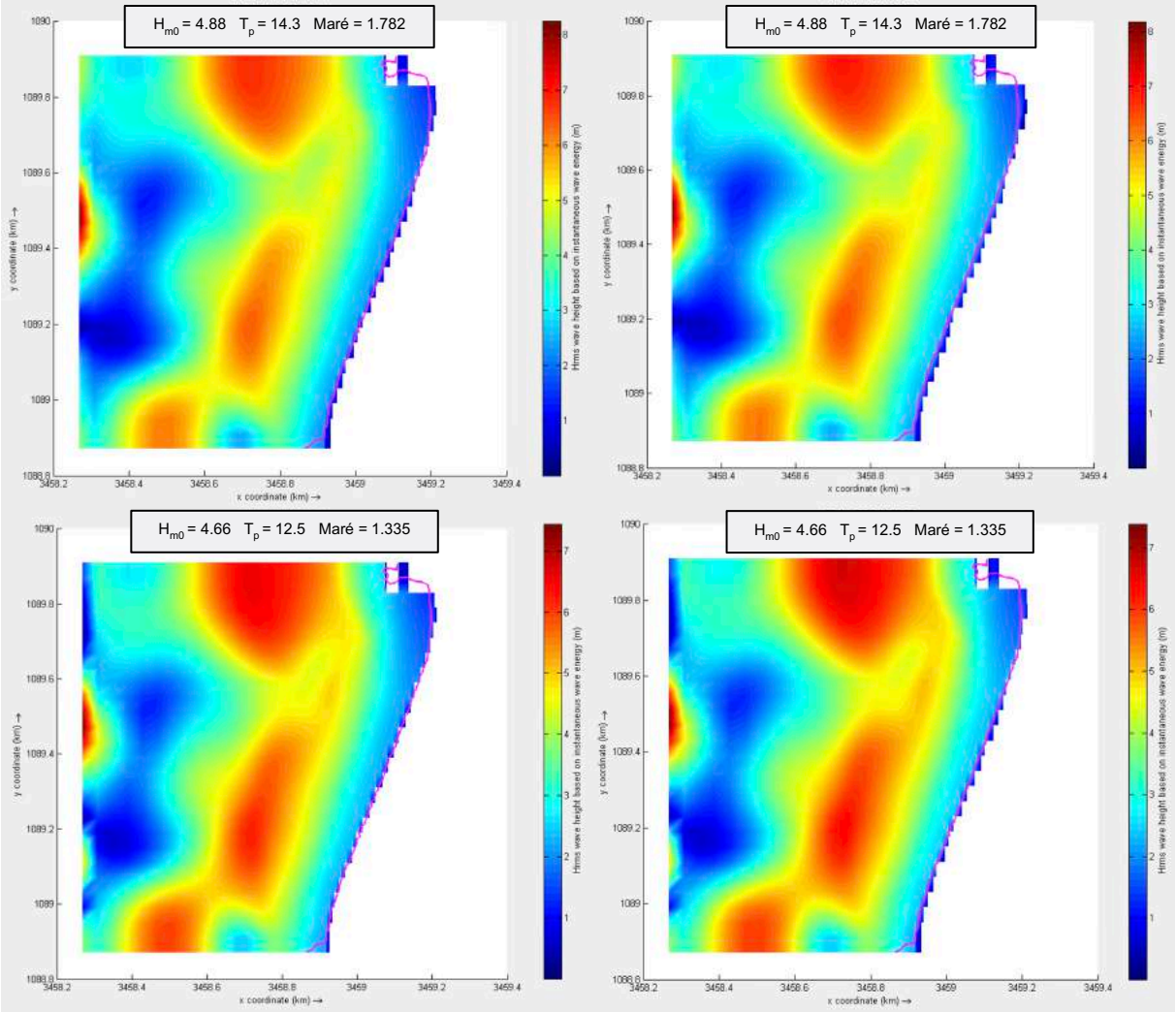


Figura 5.17 - Gráficos das alturas de onda em distintos momentos da tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e a subida de 0.5 m do nível do mar (direita).

Com a subida do nível do mar foram apresentados maiores galgamentos costeiros que na simulação 2. Na Figura 5.18 são apresentados os caudais de galgamento da simulação 4, sendo que as sondas apresentaram valores máximos de 6.14, 5.51, 6.17 e 6.31 l/s/m.

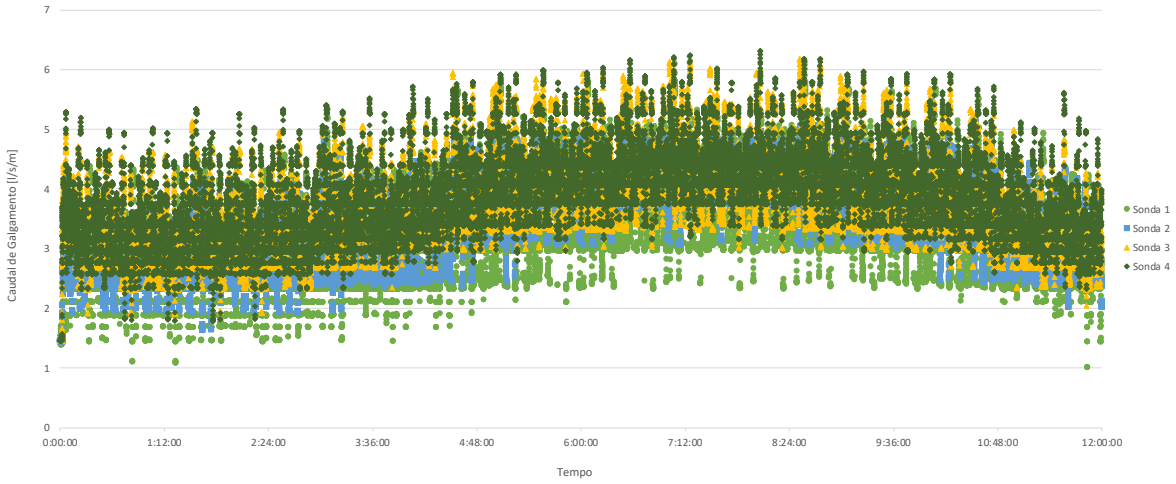


Figura 5.18 – Caudais de galgamento observados durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração a subida de 0.5 m do nível do mar.

Na Figura 5.19 é observada a evolução da cota de fundo durante a tempestade de 5 de março de 2013, considerando as condições atuais e a subida de 0.5 m do nível do mar. A cota de fundo é semelhante entre as duas situações, no entanto verifica-se que na simulação da subida de nível há zonas com uma cota ligeiramente menor. Isso deve-se às alterações morfológicas que a agitação marítima provoca devido à subida de nível de água, gerando uma maior sedimentação na zona de maior dissipação de energia, onde há um maior movimento sedimentar. Este ligeiro aumento de cota é observado em toda a extensão da praia, contudo é mais visível nas suas extremidades.

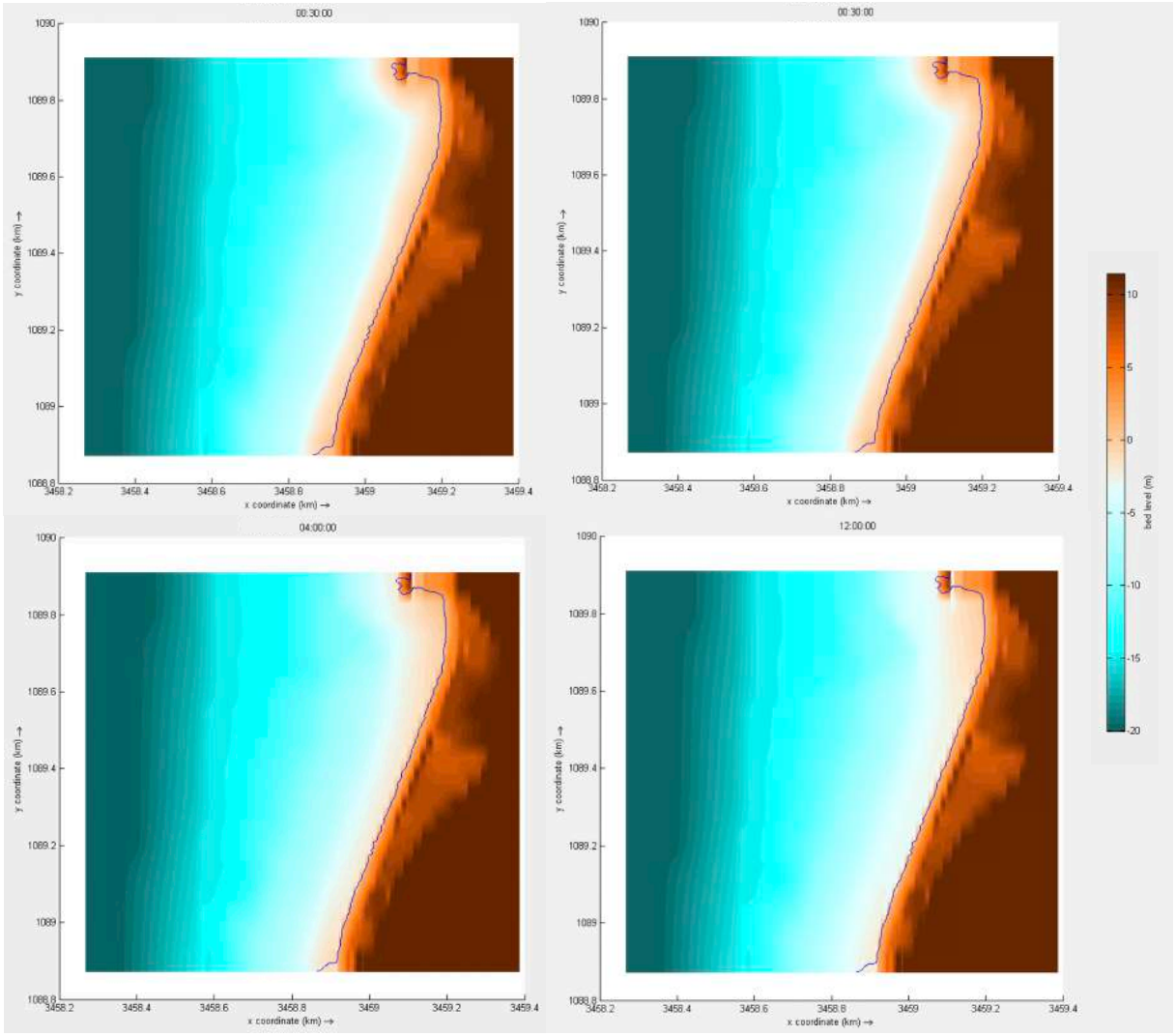


Figura 5.19 - Gráficos da evolução da cota de fundo durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e a subida de 0.5 m do nível do mar (direita).

Na figura 5.20 é possível observar a dinâmica sedimentar durante a tempestade de 5 de março de 2013, para as condições atuais e para a possibilidade de subida de 0.5 m do nível médio do mar. Com este aumento do nível do mar observa-se uma menor sedimentação ao longo da linha de costa, contudo, há uma maior acumulação de sedimentos na extremidade Oeste, próximo ao Ilhéu da Praia Formosa. Relativamente à linha de costa, esta também sofre uma maior erosão que a situação atual.

Embora sejam alterações sedimentares ligeiras, são suficientes para afetar a dinâmica da praia e proporcionar maiores galgamentos costeiros. Deste modo é observável que a erosão e os galgamentos costeiros relacionam-se entre sim, potencializando um ao outro.

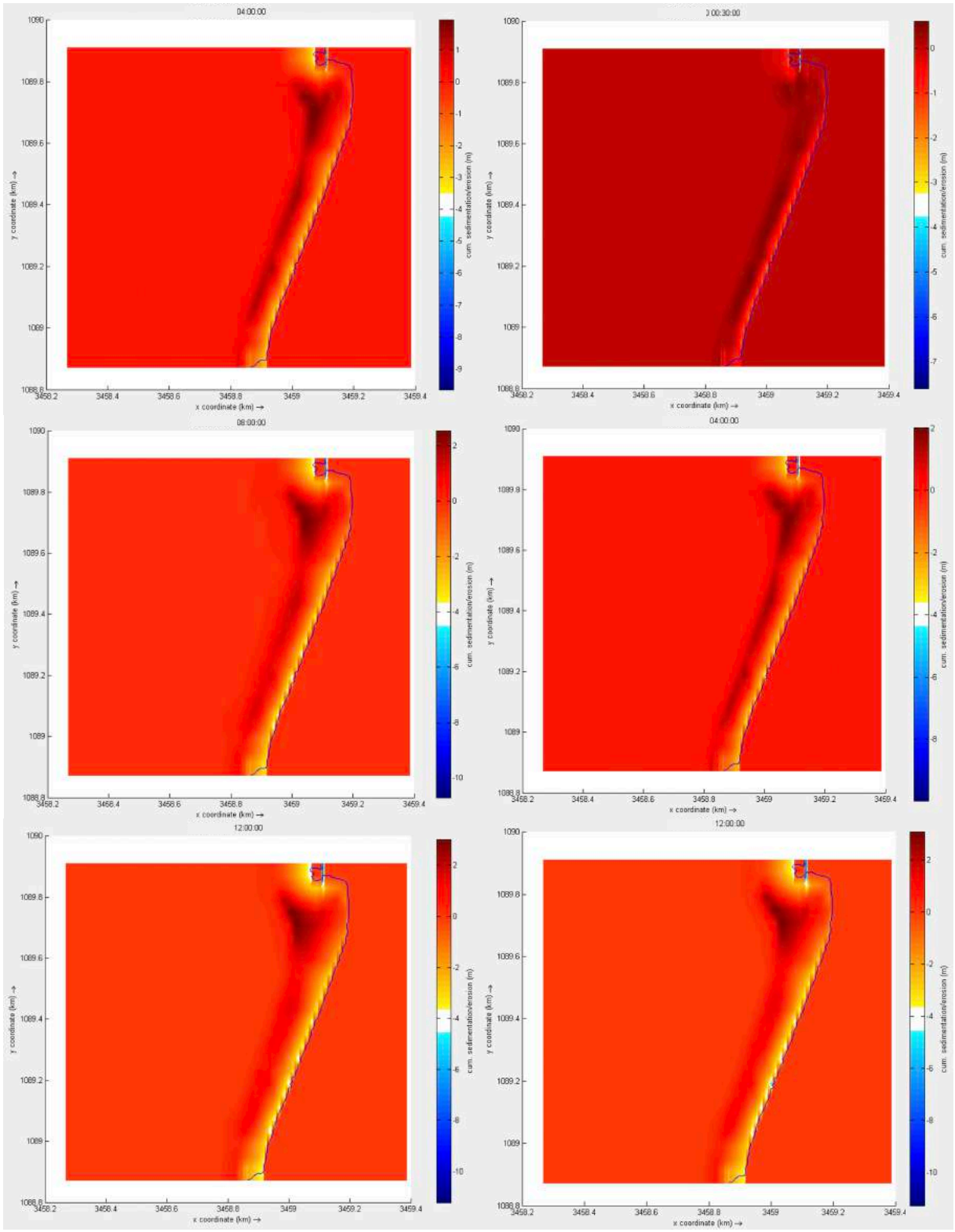


Figura 5.20 - Movimento sedimentar durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e a subida de 0.5 m do nível do mar (direita).

Conforme referido anteriormente, no contexto atual, é essencial considerar os possíveis efeitos das alterações climáticas em estudos desta natureza.

5.4.6. SIMULAÇÃO 5

Foi realizada uma simulação com alimentação artificial em cerca de 100 000 m^3 por toda a extensão da praia, desde a cota 3 m até a profundidade -6 m, ou seja, aproximadamente até os 100 m da linha de costa, na direção do Ilhéu da Praia Formosa.

Na Figura 5.21 é possível observar a comparação das alturas de onda entre a tempestade ocorrida no dia 5 de março de 2013 considerando as condições atuais da praia (lado esquerdo), com o que aconteceria caso essa tempestade decorresse com as condições de alimentação artificial descritas acima (lado direito). A altura de onda diminuiria próximo à linha de costa, no entanto seria uma pequena redução, continuaria a ocorrer galgamentos costeiros principalmente na zona Este da praia, com ondas a atingir valores superiores a 2 m.

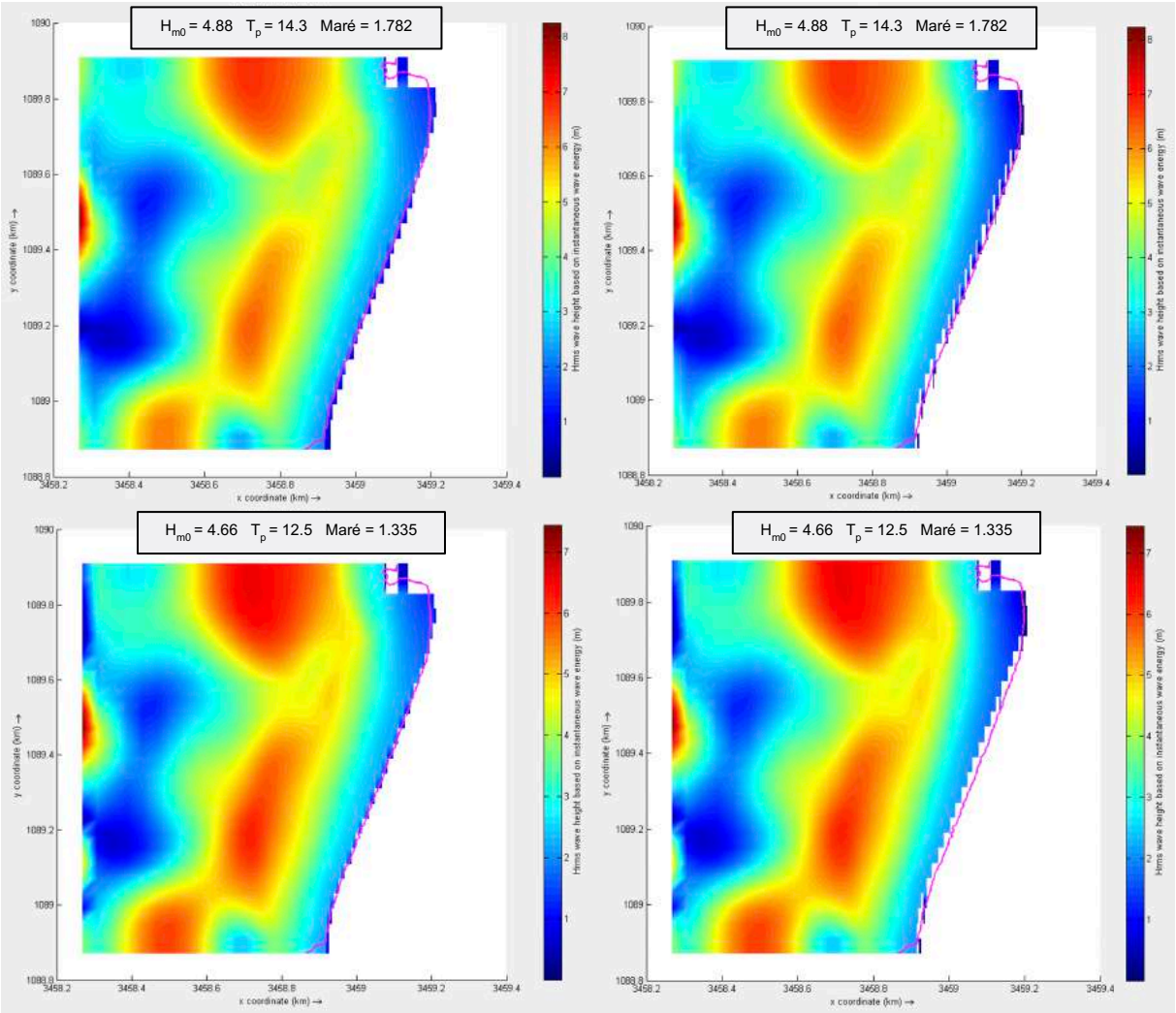


Figura 5.21 - Gráficos das alturas de onda em distintos momentos da tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e condições de alimentação artificial (direita).

As sondas apresentaram caudais máximos de galgamento de 5.05, 4.50, 4.26 e 4.76 l/s/m, valores inferiores aos da tempestade nas condições atuais. Deste modo, todos os caudais de galgamento apresentados nesta simulação foram inferiores aos da simulação 2, tal como mostra a Figura 5.22.

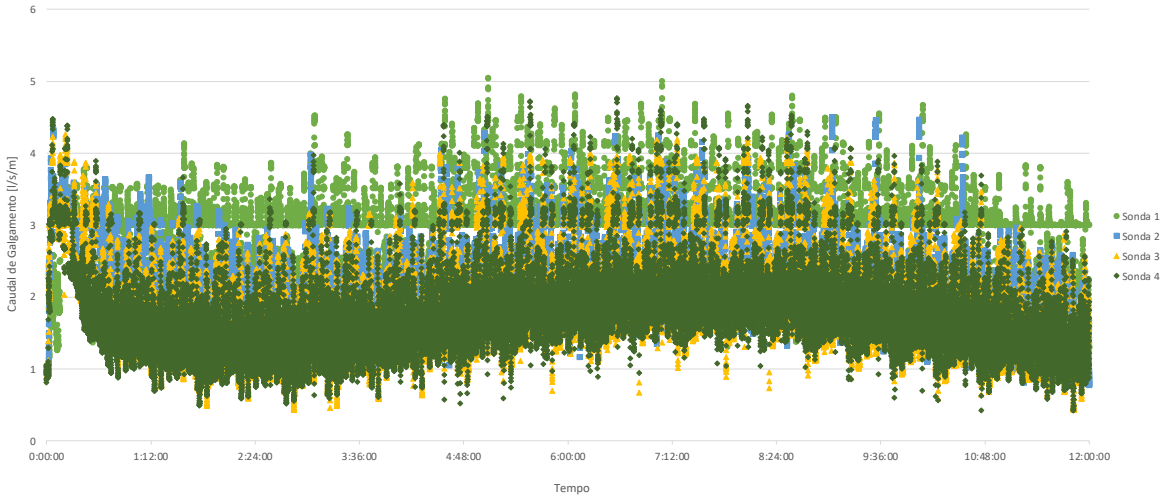


Figura 5.22 – Caudais de galgamento observados durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração a alimentação artificial da praia.

A evolução da cota de fundo encontra-se na Figura 5.23. Do lado esquerdo apresenta-se a evolução que ocorreu durante a tempestade para as condições atuais e do lado direito está a evolução do que aconteceria caso a praia fosse composta por alimentação artificial.

Inicialmente a praia com alimentação artificial tem uma cota de fundo superior, contudo, com o decorrer da tempestade é observável que a zona Este atinge os mesmos níveis de erosão que a praia atual.

O lado W da praia comporta-se de forma idêntica à situação atual. Ocorre um aumento do nível de fundo na zona abrigada pelo Ilhéu da Praia Formosa, contudo, inicialmente havia cotas de fundo superiores às apresentadas no final da tempestade devido a uma dispersão de sedimentos.

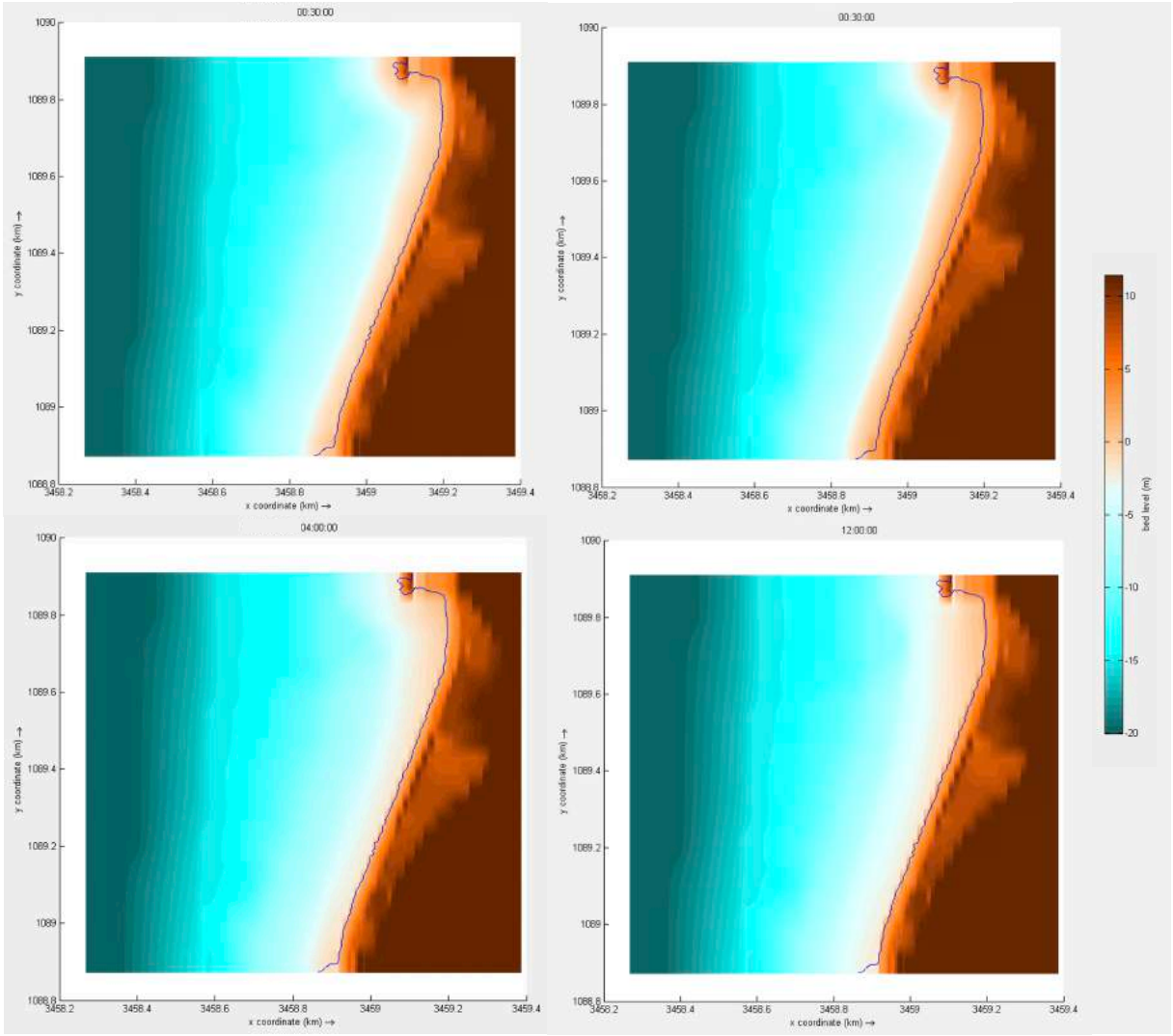


Figura 5.23 - Gráficos da evolução da cota de fundo durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e condições de alimentação artificial (direita).

Os movimentos sedimentares apresentados na praia no início e no final da tempestade encontram-se na Figura 5.24, no lado esquerdo para as condições atuais e no lado direito para a condição de alimentação artificial. Em concordância com a figura anterior, contudo de forma mais explícita, é observável que a situação de alimentação artificial sofre uma erosão muito mais intensa próximo à linha de costa e em toda a extensão da praia, com destaque na zona central e Este da praia e de frente ao Ilhéu.

A elevada agitação marítima e as correntes marítimas na zona de rebentação e espraiamento proporcionam o transporte de sedimentos para longe da praia. Tal como observado nas simulações de tempestade para a situação atual, observa-se uma acumulação de sedimentos principalmente a W, numa zona mais protegida, com redução dos mesmos algum tempo depois. Independentemente desta acumulação, a erosão é predominante e potencializa os galgamentos costeiros.

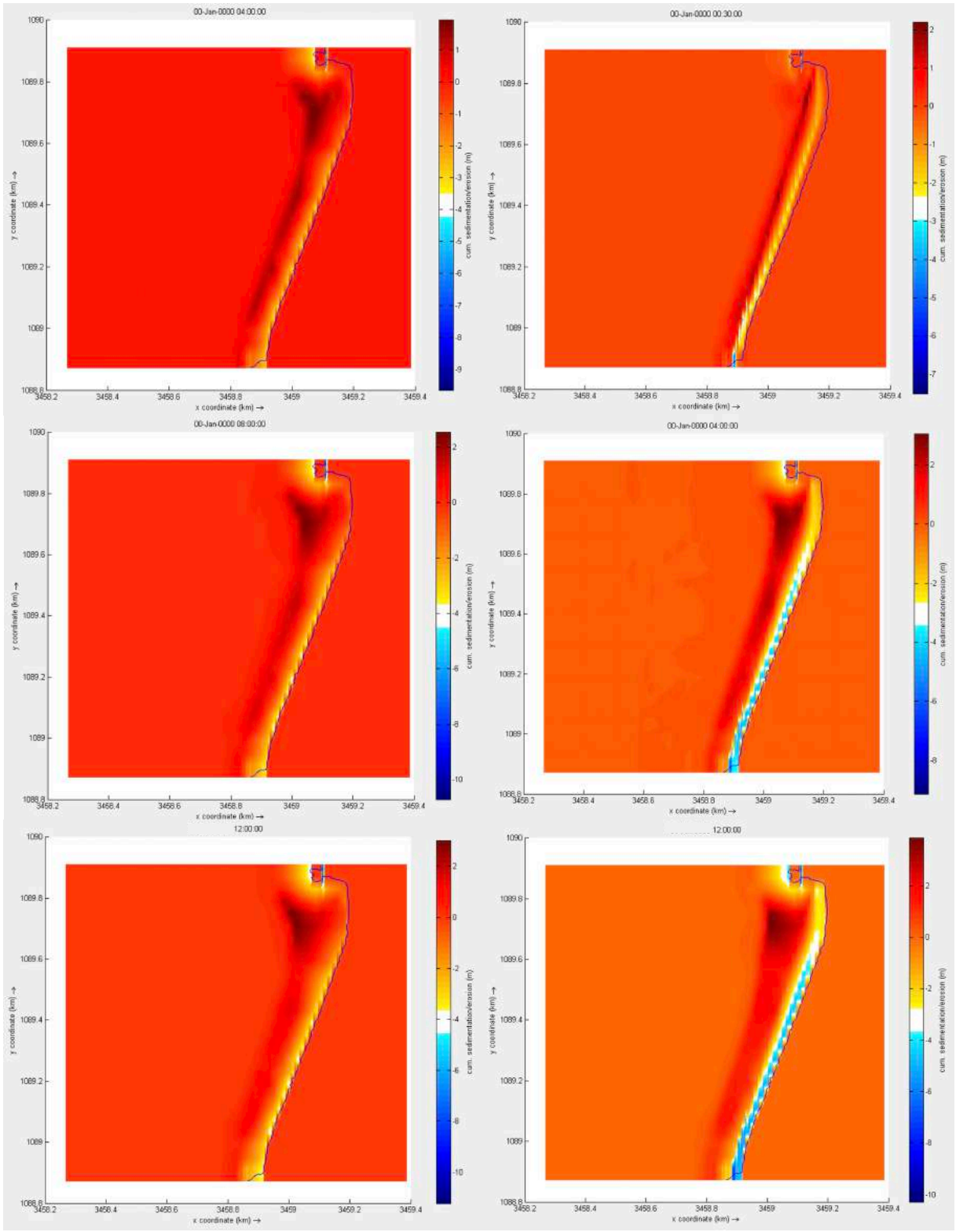


Figura 5.24 - Movimento sedimentar durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e condições de alimentação artificial (direita).

Comparando a praia atual com a alimentação artificial, é possível concluir que em condição de tempestade a praia será alvo de uma maior erosão no caso da artificialização, o que, com o tempo, originará tantos ou mais galgamentos costeiros que os observados atualmente. Neste caso, seria necessário uma elevada monitorização e constante reposição, o que não seria muito viável. Para evitar tal movimentação morfológica indesejada e proporcionar a redução dos galgamentos, poderiam ser desenvolvidas outras obras de proteção que se complementassem e realmente proporcionassem uma melhor adaptação.

5.4.7. SIMULAÇÃO 6

Foi realizada uma simulação de implementação de uma barra submersa no alinhamento da Ponta da Cruz e do Ilhéu da Praia Formosa, ou seja, a cerca de 100 m da linha de costa e paralelo à mesma, a -6 m de profundidade e com uma altura de 3 m.

A comparação das alturas de onda entre a tempestade ocorrida no dia 5 de março de 2013 considerando as condições atuais da praia e o que aconteceria caso essa tempestade decorresse com a implementação da barra submersa descrito acima, encontra-se na Figura 5.25.

Com a barra submersa, a altura de onda diminuiria significativamente ao passar por ele, uma vez que promoveria a dissipação de energia das ondas numa zona mais afastada da linha de costa. É de notar uma significativa redução da altura de onda comparativamente às condições atuais, especialmente entre a zona central e a extremidade Este da praia, onde se verificava maiores alturas de onda. Porém, entre a barra submersa e o Ilhéu da Praia Formosa repara-se um ligeiro aumento da altura de onda.

Verifica-se uma significativa influência da barra em toda a extensão da praia, sendo a extremidade Este a mais beneficiada a nível de redução de altura de onda.

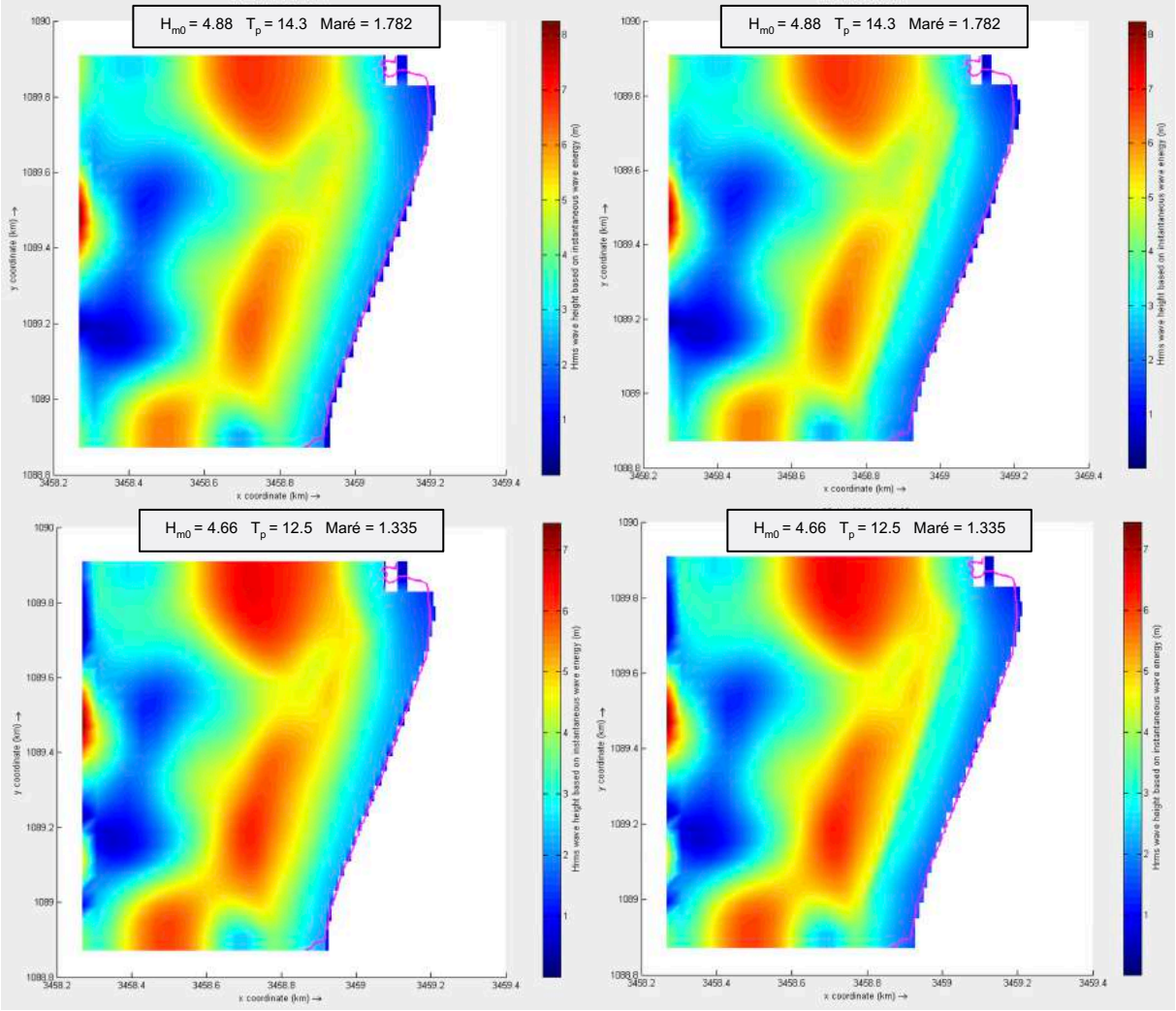


Figura 5.25 - Gráficos das alturas de onda em distintos momentos da tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e com a barra submersa (direita).

Os galgamentos costeiros desta simulação estão representados na Figura 5.26. Os caudais de galgamento apresentados pelas sondas 1 a 4 foram inferiores aos apresentados pela tempestade nas condições atuais e apresentaram valores máximos de 5.08, 4.72, 4.56 e 5.16 l/s/m, respetivamente.

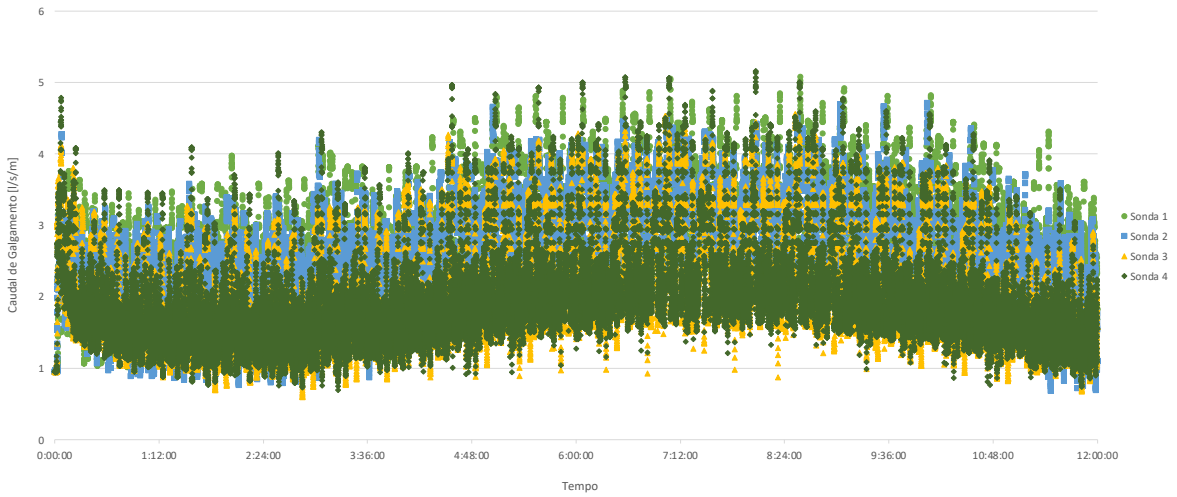


Figura 5.26 – Caudais de galgamento observados durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração implementação da barra submersa.

Na Figura 5.27 é apresentada a evolução da cota de fundo da tempestade nas condições atuais e com a implementação da barra submersa. No início da tempestade as cotas de fundo eram semelhantes entre as duas condições, no entanto, com o passar da tempestade verifica-se uma diferenciação entre as mesmas nas mudanças morfológicas.

Há uma maior acumulação de sedimentos a W, tal como na situação atual, no entanto a cota de fundo, que era mais elevada próximo à linha de costa, tende a se dissipar em direção ao mar. A barra funciona como barreira e consegue reter os sedimentos entre si e o passeio marítimo, no entanto, estes tendem a se dispersar em direção à nova estrutura.

A cota de fundo máxima passou a ser menor na zona de espraiamento, contudo, o fundo entre a barra e a linha de costa passa a ser menos inclinado. A barra favorece a proteção da praia à agitação marítima e dificulta a movimentação natural de sedimentos da praia para *offshore*.

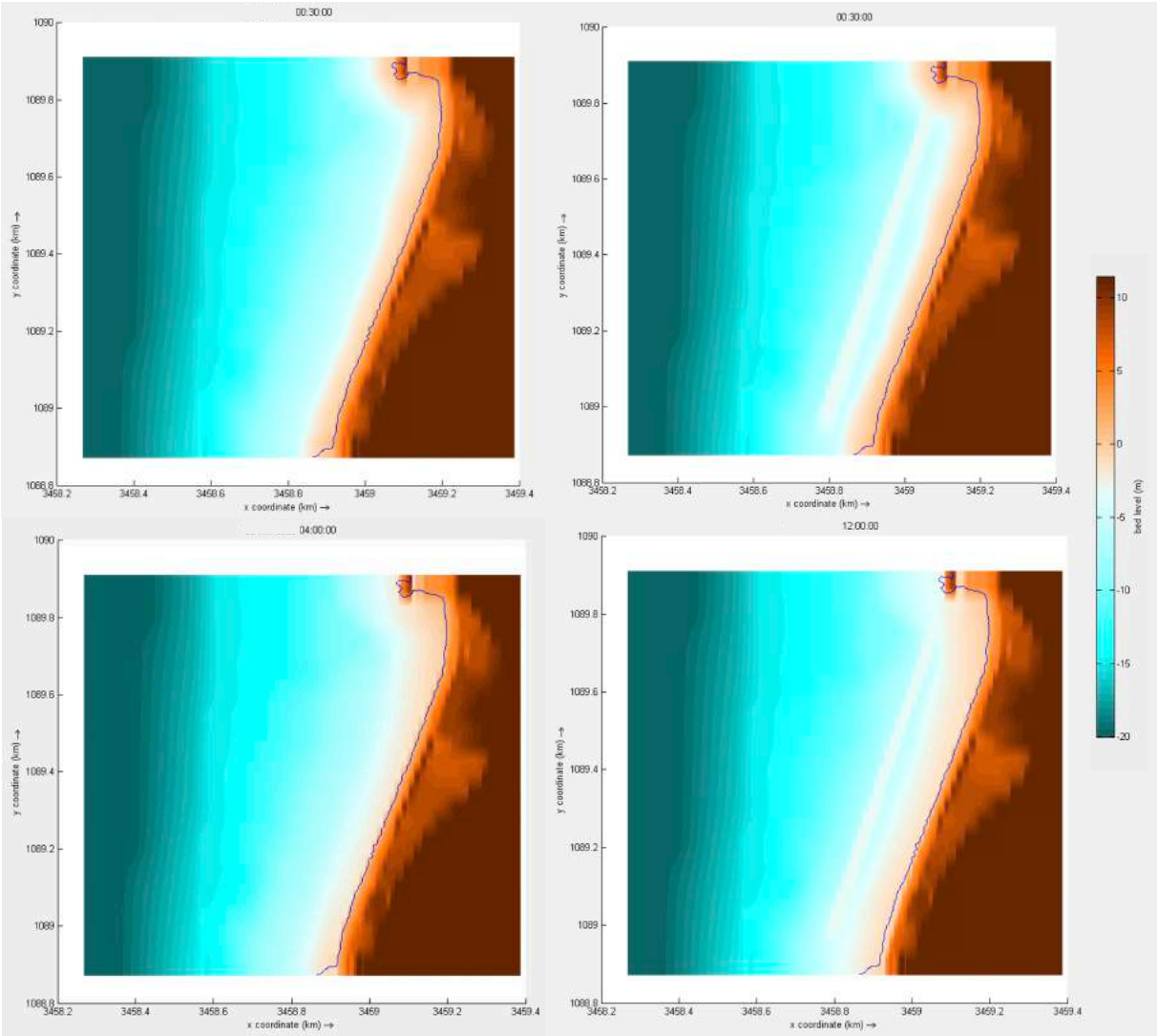


Figura 5.27 - Gráficos da evolução da cota de fundo durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e com a barra submersa (direita).

A comparação dos movimentos sedimentares entre as condições atuais e a implementação da barra submersa estão representadas na Figura 5.28, onde é observável uma significativa diferença de movimentos sedimentares na zona envolvente causada pela implementação da barra.

Continua a existir uma maior erosão na extremidade Este e de frente ao Ilhéu, no entanto, a erosão que ocorre na nova situação é muito mais intensa que nas condições atuais e a sedimentação é inferior.

A acumulação de sedimentos comporta-se de maneira distinta devido a esta construção. Observa-se um aumento de sedimentos entre a linha de costa e a barra, sendo que junto à linha de costa e à própria barra predomina a erosão.

Relativamente à linha de costa, observa-se erosão em toda a sua extensão a tender a aumentar na direção W-E, chegando a valores muito significativos na extremidade Este da praia.

À frente do Ilhéu da Praia Formosa também se verifica um aumento considerável de erosão. A barra ao ter a sua extremidade próxima ao Ilhéu, potencializa a dissipação da energia das ondas nessa zona, afetando-a e proporcionando erosão.

Em torno da barra também são observadas modificações sedimentares. À esquerda da barra verifica-se uma ligeira acumulação de sedimentos, em especial a W. Por sua vez, à direita desta estrutura, observa-se uma linha de erosão.

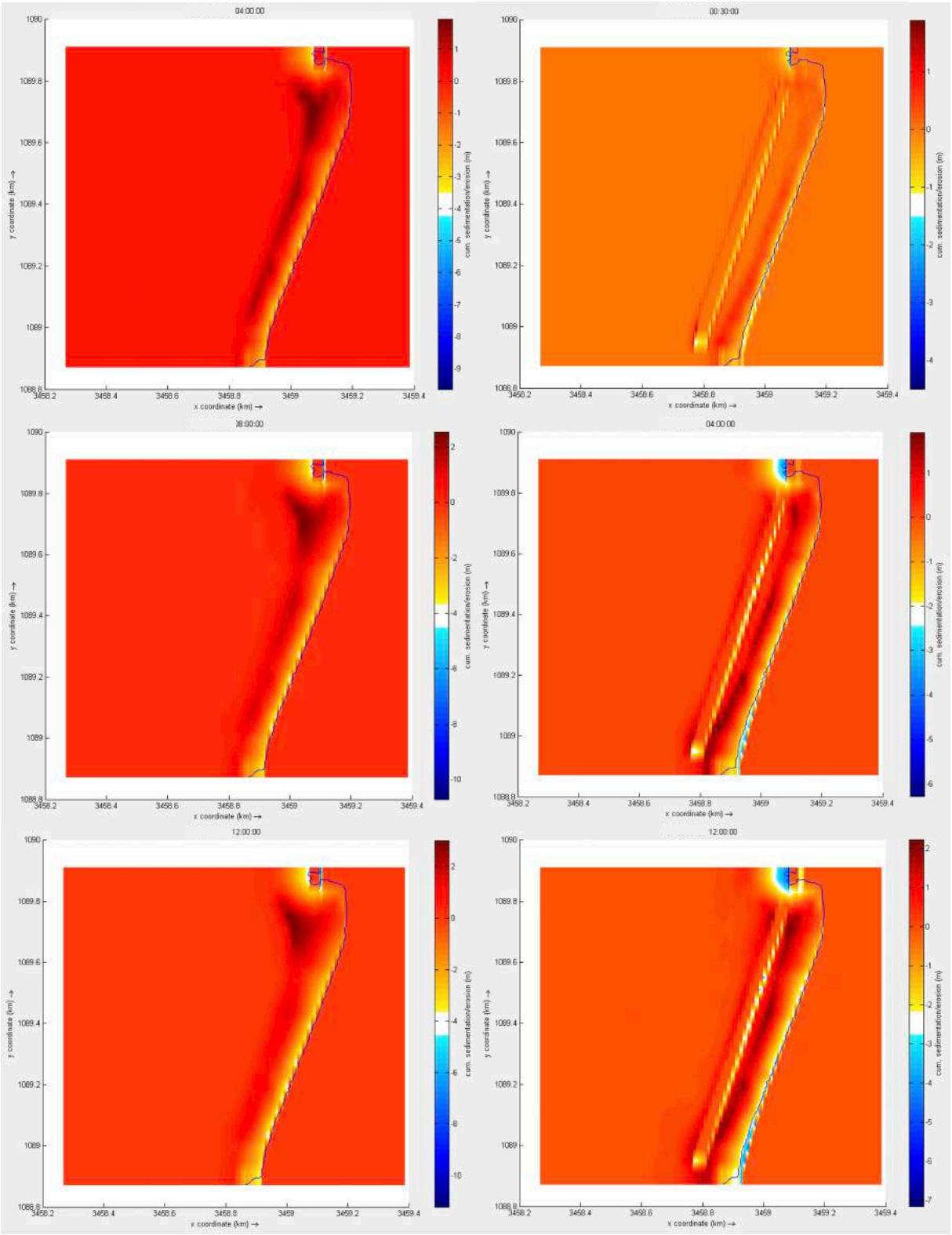


Figura 5.28 - Movimento sedimentar durante a tempestade de 5 de março de 2013, tendo em consideração as condições atuais (esquerda) e com a barra submersa (direita).

Comparando a praia atual com a implementação da barra submersa é possível concluir que em condição de tempestade a praia será alvo de menos galgamentos costeiros, pelo menos numa altura inicial. No entanto, promoverá grandes movimentos sedimentares e mudanças morfológicas, levando a uma erosão muito superior à que se tem vindo a verificar.

Esta obra de proteção poderia vir a ser viável caso fosse realizado um estudo mais intensivo e completo, de diferentes dimensões de estruturas e localizações da mesma. Também poderia aumentar a sua eficácia caso fosse implementado em simultâneo com outra estratégia, como alimentação artificial.

5.4.8. Análise Comparativa de Resultados

5.4.8.1. Galgamentos Costeiros

Na Tabela 5.3 são apresentados os valores máximos de galgamento captados em cada sonda, para cada uma das simulações.

Tabela 5.3 – Galgamento máximo obtido em cada sonda, para cada simulação

Galgamento máximo [l/s/m]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4
Simulação 1	5.58	5.17	5.99	6.43
Simulação 2	5.53	5.03	5.59	5.87
Simulação 3	4.99	4.65	5.26	5.32
Simulação 4	6.14	5.51	6.17	6.31
Simulação 5	5.05	4.50	4.26	4.76
Simulação 6	5.08	4.72	4.56	5.16

As três tempestades analisadas apresentaram valores de galgamento costeiro semelhantes e demonstraram que estes afetam maioritariamente as extremidades da praia.

A subida do nível de água em 0.5 m apresenta um galgamento superior à simulação 2, seguindo as mesmas caraterísticas que as tempestades analisadas (lado Este com caudais mais elevados).

Na simulação 5 (alimentação artificial), a extremidade Oeste é a mais afetada pelos galgamentos, seguida da outra extremidade da praia. A zona central é minimamente menos afetada, contudo também apresenta valores significativos.

Na simulação 6 (implementação da barra), a extremidade Este é a mais afetada, seguida da outra extremidade. Tal como a simulação 5, a zona central da praia é ligeiramente menos afetada, sendo que a sonda 2 apresenta valores superiores à sonda 3 (oposto do que acontece nas tempestades com as condições atuais e na subida de nível).

Entre a alimentação artificial e a implementação da barra, a primeira apresenta sempre menores valores de galgamento. Ambas são alternativas promissoras para o futuro a nível de galgamentos. No entanto, é necessário um estudo mais aprofundado para otimizar a sua concessão e minimizar eventuais impactes negativos (por exemplo, aumento de correntes perigosas para banhistas, ou redução da qualidade da água no tardoz da barra submersa).

Apesar das simulações 5 e 6 apresentarem galgamentos inferiores aos observados nas tempestades ocorridas, todos os galgamentos têm valores muito aproximados. São galgamentos ligeiros, mas que chegam a causar danos na praia, logo, continua a ser importante arranjar alternativas que reduzam ainda

mais estes galgamentos, podendo ser uma solução a aplicação combinada de várias medidas de proteção, como a implementação conjunta da barra submersa e da alimentação artificial de areia.

5.4.8.2 Simulações

Cada vez mais as alterações climáticas são uma realidade. Os seus efeitos têm vindo a afetar a vida no planeta, como por exemplo, a subida do nível médio do mar que afeta a dinâmica costeira. Com o aumento do nível do mar, as zonas costeiras tendem a recuar e o mar fica mais próximo das estruturas e atividades humanas, o que potencializa os galgamentos costeiros e a erosão costeira. Assim sendo, torna-se indispensável ter em consideração os efeitos das alterações climáticas no desenvolvimento de estratégias de adaptação climática.

Tanto a alimentação artificial como a implementação de uma barra submersa reduziriam os galgamentos costeiros na Praia Formosa, no entanto teriam consequências negativas. A extremidade Este continuaria a ser a mais afetada pela agitação marítima e a linha de costa sofreria uma variação da cota de fundo, com grande transporte sedimentar na zona costeira.

Ambas alternativas originariam uma maior erosão da praia no geral, contudo a alimentação artificial seria mais afetada pela erosão enquanto a barra provocaria maiores transportes sedimentares e mudanças morfológicas diferentes das tendências habituais. Deste modo, deveria ser analisada a possibilidade de aplicar estas duas alternativas em conjunto ou mesmo outras possíveis medidas de proteção, de forma a obter a melhor eficácia possível, promovendo uma menor erosão e menores transportes sedimentares, tendo sempre em consideração os efeitos das alterações climáticas que poderão ser sentidos nos tempos vindouros.

5.5. PROPOSTA DE ALTERNATIVAS

De forma a reduzir a erosão e os galgamentos costeiros provocados pela forte agitação marítima, podem ser implementadas diversas medidas de proteção, nomeadamente, a alimentação artificial da praia e a construção de obras de defesa como esporões, quebramares, soleiras submersas e paredões. Estas também podem ser aplicadas em conjunto, para uma maior eficiência.

Qualquer alternativa terá aspetos positivos e negativos para a proteção da praia e a valorização deste ecossistema costeiro e associados benefícios económicos e sociais. Deste modo, é importante analisá-las de forma a optar pela opção com maior eficiência e viabilidade económica, sem prejuízo do meio ambiente.

5.5.1. ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL

A alimentação artificial não aparenta ser a melhor alternativa, sobretudo se implementada como medida de proteção única. Caso fosse implementada deveria ser com areia grosseira para garantir um perfil de equilíbrio, no entanto, o acentuado declive e o transporte sedimentar que ocorre na zona da Praia Formosa proporcionariam a necessidade de monitorização regular, de frequente reposição e da consequente importação de areia, uma vez que há carência da mesma na Praia Formosa e nas zonas adjacentes.

Assim sendo, seria necessário implementar uma obra de defesa para melhorar a retenção destes sedimentos, como o caso de uma soleira submersa, no entanto, provavelmente não seria suficiente para sustentá-los devido à forte agitação marítima, às correntes e ao próprio perfil da praia.

Implementar esta solução teria custos muito elevados derivados ao investimento regular, o que poderia não compensar. Inicialmente poderia minimizar a erosão e principalmente os galgamentos costeiros, mas com o passar do tempo voltariam a aumentar a sua intensidade e frequência. Uma possibilidade seria implementá-la em simultâneo com outras estratégias de adaptação.

5.5.2. Estruturas longitudinais Aderentes

A Praia Formosa possui atualmente um paredão com crista refletora, no entanto, com a forte agitação marítima ocorre à mesma erosão e galgamentos costeiros sobre a estrutura.

A adaptação da estrutura já existente ou a construção de uma nova estrutura longitudinal aderente, como um paredão ou dique, poderão ser medidas de proteção mais promissoras tendo em consideração a situação especifica da Praia Formosa.

O dique, apesar de ser uma solução com elevada redução de galgamentos devido à eficiência na dissipação da energia das ondas e de possibilitar a conformidade com arquitetura paisagista, necessita de grande quantidade de material de construção e tem um elevado custo, tanto de construção como de manutenção. Além disso, para a sua implementação é necessário espaço, algo que é reduzido na Praia Formosa devido à proximidade do passeio marítimo que o paredão atual suporta com restaurantes ao longo de toda a sua extensão, com a zona de espraiamento. No caso da zona costeira da Praia Formosa ser restruturada, seria uma boa opção a ter em conta.

O paredão será provavelmente a melhor alternativa para a obra longitudinal aderente. Além de reduzir eficientemente a erosão e os galgamentos costeiros, requer menos espaço que os diques. Por outro lado, é mais suscetível à erosão devido à suspensão de sedimentos que pode ser causada pelo efeito de reflexão do mar no paredão, podendo levar assim à redução de sedimentos na zona. Tal como os diques, acarreta elevados custos de construção, no entanto, tem um maior impacte na paisagem da praia e oferece uma falsa sensação de segurança.

5.5.3. Estruturas longitudinais Destacadas

A implementação de quebramares destacados submersos ou de uma barra submersa poderiam ser também medidas de proteção alternativas. Ao atuar como um recife promove uma rebentação mais afastada da costa, que dissipa a energia das ondas que chegam à praia.

Reduziria a frequência e intensidade dos galgamentos costeiros devido à menor energia de onda que chega à costa, possivelmente reduziria a erosão costeira através da acumulação de sedimentos na praia devido à barreira que forma, formaria afloramentos rochosos que poderiam trazer um impacte positivo para a biodiversidade da zona, não afetaria a paisagem da praia e promoveria a prática de atividades de ondas, como *surf* e *bodyboard*, que traria benefícios para a população local e para o turismo, o que favoreceria fortemente a economia da região a longo prazo.

Por outro lado, poderia ter consequências negativas a nível da formação de correntes próximo às estruturas, podendo gerar zonas perigosas à prática balnear; a nível da erosão em certas zonas adjacentes à estrutura ou na própria estrutura, devido à forte agitação e às correntes marítimas; a nível da navegação, a falta de visibilidade e a pouca profundidade podem ser problemas para embarcações que naveguem próximo à estrutura; adicionalmente, teria um elevado custo de construção e poderia reduzir a sua eficácia com o aumento dos efeitos das alterações climáticas, como por exemplo, com a subida do nível médio do mar. Uma possibilidade seria implementá-la em conjunto com outra estratégia de proteção.

Não sendo ainda uma estrutura muito implementada em Portugal, os seus resultados são pouco conhecidos, o que implicaria um estudo completo e complexo. No entanto, seria uma possibilidade que poderia ser benéfico à Praia Formosa, à população local, ao ambiente e à região.

6
CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

As zonas costeiras encontram-se em constante desenvolvimento, devido ao seu elevado potencial, sendo crescente o interesse turístico e económico que originam. Contudo, este desenvolvimento antropogénico e as alterações climáticas em curso têm provocado um aumento de riscos costeiros, nomeadamente um aumento da frequência e intensidade de fenómenos como erosão e galgamentos costeiros. Deste modo, é de vital importância monitorizar, estudar e promover medidas de adaptação para as zonas costeiras mais expostas a tais riscos.

Na presente dissertação analisou-se a evolução da linha de costa e o risco de galgamentos costeiros na Praia Formosa, na Ilha da Madeira. Para tal, recorreu-se à ferramenta *CoastSat*, a fórmulas semi-empíricas, à rede neuronal *XBG-Overtopping*, ao *Delft3D* e ao modelo numérico *XBeach*. Desse modo, tornou-se possível analisar a sua evolução da linha de costa ao longo dos últimos anos, assim como propor e comparar possíveis alternativas que reduzam os riscos de galgamento costeiro nessa zona costeira.

Recorrendo à ferramenta *CoastSat* foi possível analisar a variação da linha de costa. Especificamente foi possível observar uma predominância no recuo, embora na zona central da praia aproximadamente se possa observar um ligeiro avanço. O recuo observado da linha da costa tem vindo a deixar a Praia Formosa mais exposta à erosão e aos galgamentos costeiros.

Através das fórmulas semi-empíricas e da ferramenta *XBG-Overtopping* observou-se que para o cenário atual, a zona em estudo é realmente vulnerável aos galgamentos e que com os previstos efeitos das alterações climáticas estes tenderão a intensificar-se. Apesar de a rede neuronal estimar caudais de galgamento inferiores aos obtidos por aplicação das fórmulas semi-empíricas, ambas as ferramentas estimam galgamentos significativos.

De forma a obter resultados mais realistas e estudar alternativas de proteção, foi aplicado o modelo numérico *XBeach.* Este modelo, ao ter em consideração a batimetria real da zona costeira, ao considerar as condições de agitação marítima e da zona envolvente, possibilita um estudo com maior rigor e mais fidedigno.

Recorreu-se ao *Delft3D* para preparar alguns *inputs* e visualização dos resultados finais. Assim, verificou-se que as tempestades mais intensas provocam galgamentos costeiros relevantes e erosão na Praia Formosa, podendo causar danos substanciais.

Os caudais médios de galgamento obtidos pela rede neuronal e pelo modelo numérico são próximos entre si, podendo ser considerados galgamentos ligeiros. Os valores obtidos pelas fórmulas semi-empíricas diferem significativamente destas estimativas. Esta diferença poderá estar relacionada com o

limite de validade de alguma fórmula não ser respeitado ou pelo uso de alguns parâmetros que foram assumidos, e que se afastam dos sugeridos no manual EurOtop.

A subida do nível médio do mar provoca um aumento de galgamentos costeiros em toda a extensão da praia. A alimentação artificial da praia com areia e a implementação de uma barra submersa reduziriam ligeiramente estes galgamentos. Estas duas alternativas parecem promissoras na redução de galgamentos. No entanto, o seu estudo foi desenvolvido muito preliminarmente nesta dissertação carecendo, portanto, de um maior aprofundamento.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com a crescente pressão antrópica e o consequente efeito das alterações climáticas, as zonas costeiras, como é o caso da Praia Formosa, estão cada vez mais vulneráveis aos riscos costeiros, como inundações, erosão e galgamentos costeiros. Esta praia tem elevados valor social e económico e, portanto, é importante estudar estratégias de adaptação.

Nomeadamente, seria essencial realizar um estudo completo com informação mais recente sobre a zona costeira da Praia Formosa, uma vez que as informações existentes e utilizadas no presente trabalho já são relativamente antigas. Os levantamentos topográficos e batimétricos que datam 2005 e o estudo da dinâmica costeira que data 2015 são alguns exemplos de informação que seria benéfico atualizar, de forma a obter um estudo mais completo, preciso e eficaz para apoiar os desenvolvimentos futuros nesta zona. Do mesmo modo, seria importante realizar um levantamento das estruturas de proteção existentes e possivelmente desenvolver novas alternativas de proteção apoiadas em novos estudos que tenham em consideração as condições atuais e os possíveis cenários futuros.

Por outro lado, com uma análise comparativa mais detalhada de diversos tipos de estrutura de proteção recorrendo às fórmulas semi-empíricas e ao *XGB-Overtopping* para estudo dos galgamentos costeiros, com a simulação de processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos nessa zona costeira através de um ou mais modelos numéricos (para comparação e precisão de resultados), e com uma análise económica e de custo-benefício para identificar a alternativa mais interessante em termos económicos, sociais e ambientais, seria possível encontrar estratégias que realmente reduzam os galgamentos costeiros e que vão de encontro com os interesses humanos e ambientais.

Os estudos numéricos referidos anteriormente deveriam ser complementados por estudos experimentais em modelo físico, a uma escala geométrica apropriada, para validação final das alternativas propostas antes da sua implementação no local.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ribeiro, J. *Riscos Costeiros – Estratégias de prevenção, mitigação e protecção, no âmbito do planeamento de emergência e do ordenamento do território.* Autoridade Nacional de Protecção Civil, 2010. ISBN: 978-989-8343-05-5.

[2] ANCORIM - Atlantic Network for Coastal Risk Management. *Riscos costeiros: para melhor os compreender e lhes fazer face.* Espanha, 2010.

[3] Rumson, A., Hallett, S., Brewer, T. *Coastal risk adaptation: the potential role of accessible geospatial Big Data.* Marine Policy, Volume 83, 2017, p. 100-110.

[4] Pereira, C., Coelho, C. *Mapas de Risco das Zonas Costeiras por Efeito da Ação Energética do Mar.* Revista da Gestão Costeira Integrada, Volume 13, 2013, p. 27-43.

[5] Geeraerts, J., Troch, P., Rouck, J., Verhaeghe, H., Bouma, J. *Wave overtopping at coastal structures: prediction tools and related hazard analysis.* Journal of Cleaner Production, Volume 15, 2007, p. 1514-1521.

[6] Afonso, L. *Estudo Numérico do Galgamento de Estruturas de Proteção Costeira.* Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011.

[7] Almeida, H. Erosão e Galgamentos na Costa Portuguesa. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Educação e Ciências Lisboa, 2019.

[8] Cardona, F. *Avaliação do risco de erosão, galgamento e inundação costeira em áreas artificiais de Portugal continental: Estratégias de adaptação face a diferentes cenários de risco (relocalização, acomodação e proteção).* Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2015.

[9] Santos, F., Lopes, A., Moniz, G., Ramos, L., Taborda, R. *Grupo de Trabalho do Litoral: Gestão da Zona Costeira: O desafio da mudança.* Santos, F., Lopes, G., Lopes, A., Lisboa, 2017. ISBN: 978-989-99962-1-2.

[10] Milanes, C. *Coastal Risk.* Encyclopedia of Coastal Science, 2ª edição, 2018, p. 524-534, Finkl, C., Makowski, C.

[11] Coelho, C. *Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira.* Dissertação de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 2005

[12] Brito, S. *Estudo do Galgamento em Estruturas Marítimas.* Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2007.

[13] EurOtop. *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application.* Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., 2018.

[14] U. S. Army Corps of Engineering – USACE. Coastal Engineer Manual, Part VI, 2001, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg.

[15] Marques, M. *Avaliação de Soluções para Redução do Risco de Galgamento em Frentes Costeiras Urbanizadas para Diferentes Cenários de Alterações Climáticas.* Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2021.

[16] CEDRU – Centro de Estudos de Desenvolvimento Regional e Urbano, Universidade de Aveiro. *Programa da Orla Costeira Ovar - Marinha Grande: Relatório do Programa.* 2016. (https://apambiente.pt/sites/default/files/_SNIAMB_Agua/DLPC/POC/POC_OMG/v_final/3_POCOMG_Relatorio.pdf). Acedido em março de 2022.

[17] Observatório Clima Madeira. *Clima.* (https://observatorioclima.madeira.gov.pt/clima/). Acedido em março de 2022.

[18] Gomes, A., Avelar, D., Santos, F., Costa, H. e Garrett, P. *Estratégia de Adaptação às Alterações Climáticas da Região Autónoma da Madeira.* Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais, 2015. ISBN: 978-989-95709-6-2.

[19] APA – Agência Portuguesa do Ambiente. *Plano de Ação Litoral XXI.* 2017. (https://apambiente.pt/sites/default/files/_Agua/DLPC/Acao_valorizacao/PAL-XXI_Actualizacao_FINAL_actnov19.pdf). Acedido em março de 2022.

[20] Policy Research Corporation. *The economics of climate change adaptation in EU coastal areas.* European Commission, 2009. ISBN 978-92-79-12065-7

[21] Bessa, M. Dimensionamento e Avaliação Experimental do Comportamento de Estruturas de Defesa Costeira Longitudinais Aderentes. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

[22] Mesuras, T. *Estratégia de Adaptação de frentes urbanas ao risco de galgamentos e inundações costeiras – O Caso de Estudo do Furadouro (Ovar).* Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2018.

[23] Rijn, L. *Design of hard coastal structures against erosion*. 2013. (https://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Coastalstructures2013.pdf). Acedido em maio de 2022.

[24] Reis, M., Santos, J., Capitão, R., Neves, D., Fortes, C. *Avaliação da probabilidade de ocorrência de galgamentos não admissíveis no posto 2 do terminal de granéis líquidos do porto de Sines.* Territorium: Revista Portuguesa de riscos, prevenção e segurança, 2014, p. 95-113.

[25] Sabino, A., Poseiro, P., Rodrigues, A., Reis, M., Fortes, C., Reis, R., Araújo, J. *Coastal risk forecast system.* Journal of Geographical Systems, 2018, p. 159-184

[26] Silva, P. Cálculo de galgamento em estruturas marginais: O caso de Cova Gala. 2021. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2019.

[27] Ramalho, T. A Cova tem o mar à porta e cada vez menos praia. 2018. (https://www.publico.pt/2018/01/06/local/noticia/a-cova-tem-o-mar-a-porta-e-cada-vez-menos-praia-1798325) . Acedido em junho de 2022.

[28] Ouicoude. *Gâvres.* 2008. (https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5703950). Acedido em abril de 2022.

[29] ANCORIM - Atlantic Network for Coastal Risk Management. *Tomada de Decisão e Riscos Costeiros: Guia de Boas Práticas.* Irlanda, 2017.

[30]. Waikīkī. (https://dlnr.hawaii.gov/occl/waikiki/). Acedido em maio de 2022.

[31] Sancho, F., Oliveira, F., Freire, P. *Estudo de Viabilidade Técnica de Requalificação da Praia Formosa.* 4as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, 2005.

[32] Andrade, C., Taborda, R., Freitas, M., Dionísio, S. *Estudo da Dinâmica Costeira na Região da Praia Formosa, Madeira.* Lisboa, 2005.

[33] Agência Lusa. *Capitania do Funchal recomenda que embarcações permaneçam nos portos.* 2022, Madeira. (https://www.dnoticias.pt/2022/2/19/297530-capitania-do-funchal-recomenda-que-embarcacoes-permanecam-nos-portos/). Acedido em abril de 2022.

[34] Drumond, O. Praia Formosa continua 'virada ao avesso' ma semana depois do mau tempo. 2022, Madeira. (https://www.dnoticias.pt/2021/2/9/250007-praia-formosa-continua-virada-do-avesso-uma-semana-depois-do-mau-tempo/). Acedido em maio de 2022.

[35] Instituto Hidrográfico. *Rede de Boias.* (https://www.hidrografico.pt/boias). Acedido em abril de 2022.

[36] Andrade, C. *Avaliação do Desempenho de uma Intervenção de Proteção Costeira no Gana: Caso de Estudo.* Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2021.

[37] Santos, J. Frentes *Marítimas Urbanas: Caso de Estudo da Frente Mar do Funchal*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa, 2016.

[38] Deltares. XGB-Overtopping. (https://www.deltares.nl/en/software/overtopping-xgb/#features). Acedido em abril de 2022.

[39] XBeach – User Manual. 2015. (https://xbeach.readthedocs.io/en/latest/user_manual.html). Acedido em junho de 2022.

[40] Deltares. XBeach Manual - Model description and reference guide to functionalities. 2015.

[41] Heleno, A. Avaliação do espraiamento e inundação nas praias da Costa da Caparica: modelação com o modelo XBEACH. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2017.

Anexo A

Tabela A.1 – Coordenadas dos transetos e da linha de costa de referência

Transectos	X_A	Y_A	X_B	Y_B	X_C	Y_C
PF1	-1887591.5	3847922.1	-1887517.4	3847774.5	-1887633.8	3847854.7
PF2	-1887282.4	3847887.8	-1887406.0	3847727.2	-1887328.1	3847998.4
PF3	-1887194.6	3847797.5	-1887327.6	3847657.6	-1887094.5	3847819.4
PF4	-1887086.2	3847749.1	-1887243.7	3847579.7	-1886957.4	3847716.4
PF5	-1886976.2	3847677.5	-1887146.3	3847495.3	-1886832.0	3847652.9
PF6	-1886922.2	3847581.8	-1887043.3	3847434.0	-1887035.3	3847561.6
PF7	-1886819.6	3847500.7	-1886962.8	3847348.6	-1886685.5	3847503.0
PF8	-1886732.1	3847416.5	-1886863.9	3847270.8	-1886651.0	3847326.7
PF9	-1886630.4	3847350.4	-1886773.8	3847191.2	-1886545.8	3847240.3
PF10	-1886583.8	3847237.1	-1886683.7	3847136.3	-1886544.8	3847307.3
PF11	-1886567.8	3847110.2	-1886668.5	3847108.1	-1886526.6	3847064.6

Tabela A.2 – Valores do cálculo de [AB]

[AD] = X_B-X_A [m]	[BD] = Y_B-Y_A [m]	AB [m]
74.05	-147.59	165.12
-123.61	-160.58	202.65
-133.06	-139.91	193.08
-157.48	-169.31	231.23
-170.08	-182.17	249.23
-121.04	-147.78	191.03
-143.25	-152.07	208.92
-131.84	-145.77	196.55
-143.45	-159.20	214.29
-99.89	-100.79	141.90
-100.74	-2.07	100.77

Anexo B

```
wavemodel    = surfbeat

%%% Bed composition parameters %%%%%%%%%%%%%%%

D50          = 0.0008
D90          = 0.0015

%% Flow boundary condition parameters %%%%%%%

front        = abs_2d
back         = abs_2d

%% Flow parameters %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

bedfriccoef  = 55

%%% Grid parameters %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

depfile      = bed.dep
posdwn       = -1
alfa         = 0
thetamin     = -90
thetamax     = 75
dtheta       = 10
thetanaut    = 0
gridform     = delft3d
xyfile       = xy.grd

%%% Model time %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

tstop        = 43200

%%% Morphology parameters %%%%%%%%%%%%%%%%%%%

morfac       = 1
wetslp       = 0.3
dryslp       = 1
struct       = 1
ne_layer     = Subm_WB.dep
C            = 55
```

```
%%% Tide boundary conditions %%%%%%%%%%%%%%%%%%

zs0file      = tide.txt
tideloc      = 1

%%% Wave boundary condition parameters %%%%%%%%%

wbctype      = jonstable

%%% Wave-spectrum boundary condition parameters %

bcfile       = jonswap.txt
random       = 0
dtbc         = 1

%%% Output variables %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

outputformat = netcdf
tintm        = 1800
tintg        = 1800
tstart       = 0

nglobalvar   = 3
H
zb
sedero

nmeanvar     = 3
H
zb
sedero

nrugauge     = 4
3459191.        1089837.
3459141.        1089550.
3459006.        1089188.
3458968.        1089100.
```

Figura B.1 – Exemplo de um ficheiro *params.*