

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Avaliação de vulnerabilidade costeira a tempestades em ilhas  
barreira, para períodos de retorno multi-paramétricos



Maria Margarida Tarrío Agreiro Bezerra

Doutoramento em Ciências do Mar, da Terra e do Ambiente,  
Ramo Geociências, Especialidade Dinâmica do litoral

2023

**UNIVERSIDADE DO ALGARVE**

Avaliação de vulnerabilidade costeira a tempestades em ilhas  
barreira, para períodos de retorno multi-paramétricos

Maria Margarida Tarrio Agreiro Bezerra

Doutoramento em Ciências do Mar, da Terra e do Ambiente,  
Ramo Geociências, Especialidade Dinâmica do litoral

Tese orientada por:

Doutor Óscar Ferreira (Universidade do Algarve)

2023



## **Dedicações**

*Dedico à minha família, em especial à minha melhor amiga, a minha mãe, sempre presente, que me apoia incondicionalmente e sempre me deu amor. Por me transmitir confiança em mim e por ter transmitido tudo o que me faz ser hoje uma mulher e mãe!*

*À minha querida avó Cila que me dá sempre aquela palavra amiga quando mais preciso e me transmitiu a conexão com a natureza. Serei sempre a tua belhá!*

*Ao meu pai que apesar dos desencontros que a vida colocou entre nós, sinto que sempre acreditou em mim e no fundo ambos só queremos sentir e fazer parte da vida um do outro.*

*Ao meu avô Zé Agreiro e avó velha que já partiram, mas estão sempre tão presentes.*

*À Noah que é tudo em mim, amo-te muito!*

### ***Liberdade***

*Aqui nesta praia onde  
Não há nenhum vestígio de impureza,  
Aqui onde há somente  
Ondas tombando ininterruptamente,  
Puro espaço e lúcida unidade,  
Aqui o tempo apaixonadamente  
Encontra a própria liberdade.*

Sophia de Mello Breyner Andresen

## Agradecimentos

*A todos os amigos que sempre me incentivaram a continuar e a não desistir para fechar este capítulo da minha vida.*

*Ao Óscar por me ter proporcionado todas as experiências e aprendizagens em volta do mar, por ter apostado em mim desde o início, por acreditar em mim e na minha dedicação e esforço neste trabalho.*

*Aos meus colegas e amigos do mar e da praia. Saudades dos tempos em saídas de campo!*

O presente estudo foi possível através do seguinte apoio financeiro:

- Bolsa de doutoramento concedida pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) (SFRH/BD/81722/2011)
- Bolsa de investigação concedida pelo Centro de Investigação Marinha e Ambiental (CIMA)

Os dados de agitação marítima e de modelação marítima foram fornecidos pelo Instituto Hidrográfico (<http://www.hidrografico.pt/>) e *Puertos del Estado* (<http://www.puertos.es/>), respetivamente.

Os parâmetros morfológicos foram extraídos com base em Modelos Digitais de Terreno (MDT) de alta resolução dos levantamentos LiDAR (“*Light Detection And Ranging*”) de 2009 e 2011, disponíveis para fins científicos, no Centro de Investigação Marinha e Ambiental (CIMA) da Universidade do Algarve (UAlg).

## Resumo

O primeiro objetivo deste trabalho consistiu na determinação da vulnerabilidade a colisão e a galgamento das barreiras arenosas em estudo, com base na análise probabilística das ocorrências de máximos anuais de níveis de *run-up* para períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos multi-paramétricos, e para diferentes classes de pendor de face de praia definidas para cada seção de 100 m, ao longo da série temporal de 19 anos. Os regimes de colisão e galgamento foram obtidos através de uma adaptação à abordagem de *Sallenger* (2000). Praticamente toda a extensão de base de duna da zona de estudo é propensa a colisão, exceto nas seções que foram definidas com larguras de berma acima do *threshold* de colisão. O regime de galgamento ocorre para períodos de retorno de 5 anos em praticamente toda a extensão da zona ocidental da Ilha da Barreta e do extremo nascente da zona oriental da Ilha da Culatra. Nas zonas central da Península do Ancão e oriental da Ilha da Armona o regime de galgamento ocorre para períodos de retorno de 5 e 25 anos com algumas seções para períodos de retorno de 50 anos.

O segundo objetivo consistiu na determinação dos Índices Costeiros de erosão e de galgamento, para tempestades com períodos de retorno de 10 e 50 anos multi-paramétricos, e consequente identificação de *hotspots* de erosão e galgamento, de acordo com o método de avaliação de risco costeiro CRAF1 (*Coastal Risk Assessment Framework - Phase I*). Na generalidade, a zona em estudo é caracterizada por índices costeiros de erosão e galgamento médios a baixos, com exceção da zona central da Península do Ancão, realçando esta como *hotspot* tanto para erosão como para galgamento para tempestades com períodos de retorno de 10 e 50 anos. Os resultados obtidos demonstram concordância com os obtidos em estudos anteriores.

*Palavras-chave:* Erosão, Galgamento, Tempestades, Vulnerabilidade, Índice Costeiro.

## **Abstract**

The first objective of this work was to determine the vulnerability to collision and overwash of the sand barriers under study based on the probabilistic analysis of the occurrences of annual maximum run-up levels for multiparametric return periods of 5, 10, 25 and 50 years, and for different beach face slope classes defined for each 100 m section, over the 19-year time series. The collision and overwash regimes were obtained through an adaptation of *Sallenger's* (2000) approach. Practically the entire dune base extension of the study zone is prone to collision, except in the sections that were defined with berm widths above the collision threshold. The overwash regime occurs for 5-year return periods in practically the entire extension of the western zone of Barreta Island and the eastern end of the eastern zone of Culatra Island. In the central zones of Ancão Peninsula and eastern zones of Armona Island, the overwash regime occurs for 5 and 25-year return periods, with some sections for 50-year return periods.

The second objective consisted in determining the erosion and overwash coastal indices for storms with 10 and 50-year multiparametric return periods, and consequent identification of erosion and overwash hotspots, according to the coastal risk assessment method CRAF1 (Coastal Risk Assessment Framework - Phase 1). In general, the area under study is characterized by medium to low erosion and overwash coastal indices, with the exception of the central area of Ancão Peninsula, highlighting this as a hotspot for both erosion and overwash for storms with 10 and 50-year return periods. The results obtained demonstrate agreement with those obtained in previous studies.

**Keywords:** Erosion, Overwash, Storms, Vulnerability, Coastal Index.

## Resumo alargado

O impacto das tempestades nas zonas costeiras traduz-se na erosão de praias e dunas, no galgamento ou inundação de áreas naturais e na destruição de estruturas socioeconómicas em áreas costeiras ocupadas. Tempestades com maior altura de onda são assumidas como as que causam maior erosão, mas outros parâmetros também influenciam a resposta morfodinâmica. Alguns destes parâmetros estão relacionados com as tempestades (duração, período de pico, nível do mar) e com a zona costeira sujeita ao impacto (morfologia e exposição da praia).

Este trabalho visa apostar numa perspetiva inovadora em termos de definição da vulnerabilidade costeira, definindo períodos de retorno multi-paramétricos, ou seja, associados a um conjunto de parâmetros, através da análise de probabilidade de ocorrência destes parâmetros e do grau de exposição e morfologia da praia. Assim, o cálculo de vulnerabilidade a erosão e galgamento costeiro esteve associado a períodos de retorno baseados na resposta (níveis de recuo) ao invés de períodos de retorno baseados numa característica única associada a uma tempestade. Para tal, foi adotada a abordagem de resposta (*response approach*), onde foi estimada a probabilidade conjunta da ocorrência de perigos (erosão ou galgamento) induzidos ao longo da costa, face aos parâmetros forçadores hidrodinâmicos e aos parâmetros recetores morfológicos.

A Ria Formosa, por consistir num corpo lagunar protegido por um sistema de ilhas e penínsulas barreira de elevações reduzidas, com elevado valor ecológico, e estar sujeita a múltiplas atividades antrópicas, é considerada um sistema muito complexo e com potencial para ocorrência de impactos significativos devido a eventos de tempestades extremas. A zona costeira em estudo corresponde a um troço costeiro arenoso do sistema lagunar da Ria Formosa, com aproximadamente 35 quilómetros de extensão, desde o extremo poente da Península do Ancão ao extremo nascente da Ilha da Armona.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi imprescindível a criação de uma base de dados contínua com registos de parâmetros de agitação marítima (altura significativa da onda –  $H_s$  (m), período de pico –  $T_p$  (s), direção da onda –  $Dir$  (°)) e de elevação do nível do mar (nível de maré + *storm surge*) em relação ao Nível Médio do Mar (m). Esta base de dados foi compilada com frequência de 3 em 3 horas para uma série temporal de 19 anos (desde 10 de

fevereiro de 1993 a 31 de março de 2012). Para a criação da base de dados de agitação marítima foram utilizadas quatro fontes distintas: medições de agitação marítima das bóias ondógrafo ao largo de Faro e do Golfo de Cádiz, e dados de modelação marítima do conjunto de dados SIMAR-44 e WANA. Para a criação da base de dados de nível do mar foram utilizados os dados da rede REDMAR, nomeadamente dos marégrafos de Huelva e de Bonanza.

A partir da base dos dados de agitação de 19 anos foram individualizados os eventos de tempestade através de análise POT (*Peak Over Threshold*). O *Threshold*, a partir do qual foi considerado temporal na zona costeira em estudo, assumido na análise POT, foi de  $H_s \geq 2,5$  m. O tempo mínimo de duração acima do *Threshold* de tempestade considerado neste estudo foi de 6 horas. O período de tempo, entre tempestades, considerado para individualizar dois eventos de tempestade independentes consecutivos, foi de 72 horas.

Após a individualização de eventos de tempestades, de acordo com os critérios mencionados anteriormente, estes foram separados por eventos de tempestades de sudoeste (181-342°) e de sudeste (69-180°). No total, foram obtidos 129 e 70 eventos de tempestade de sudoeste e sudeste, respetivamente. Para cada evento foi encontrado o valor de nível do mar máximo e, para o mesmo exato momento de ocorrência, os respetivos valores de altura significativa, período de pico e direção das ondas. Com base nos valores de direção de onda de cada evento de tempestade e na orientação da linha de costa de cada área (península do Ancão, e ilhas da Barreta, Culatra e Armona) foram determinados os respetivos ângulos de incidência de cada evento de tempestade para cada área. Posteriormente, foram criadas duas matrizes, uma com dados para as tempestades de sudoeste, utilizados para os cálculos probabilísticos a aplicar para as áreas do flanco ocidental (Península do Ancão e Ilha da Barreta), e outra com dados para as tempestades de sudeste a aplicar no flanco oriental (Ilhas da Culatra e Armona). Cada uma destas matrizes contém as datas do início de cada evento de tempestade (ano, mês, dia, horas, minutos e segundos), a duração de cada evento, o nível do mar máximo registado em cada evento e respetivos valores de altura significativa e período de pico, e os ângulos de incidência de cada evento consoante cada área. Estas matrizes com os dados relativos aos eventos de tempestades de sudoeste e de sudeste foram determinantes para os cálculos de recuo máximo ( $R_{max}$ ).

Os processos modeladores de zonas costeiras, tais como, os fenómenos de erosão e galgamento têm como condicionantes fatores hidrodinâmicos (ação das ondas, nível de maré, *storm surge*) mas, também, as características morfológicas da zona costeira. Daí que o conhecimento detalhado e o mais rigoroso possível dos parâmetros morfológicos intrínsecos das barreiras arenosas em estudo tenha sido fundamental para o desenvolvimento do presente trabalho.

De forma a caracterizar e definir os parâmetros morfológicos (elevação da crista da duna, largura da duna, elevação da base da duna, largura da berma, elevação da crista da berma, pendora de face de praia, elevação da linha de baixa-mar e profundidade de fecho) coerentemente ao longo da zona de estudo foram assumidos os mesmos critérios para todas as áreas em estudo. Todos estes parâmetros foram extraídos e/ou determinados com base em Modelos Digitais de Terreno (MDT) de alta resolução dos levantamentos LiDAR (“*Light Detection And Ranging*”) de 2009 e 2011, através de ferramentas disponíveis em Sistemas de Informação Geográfica, a cada 10 m em toda a zona de estudo. Após a extração e/ou determinação dos parâmetros morfológicos, foram individualizadas secções de 100 metros ao longo de cada uma das áreas em estudo, para as quais foi atribuído o valor médio destes parâmetros, correspondente à média dos 10 valores de cada parâmetro contidos dentro da respetiva secção.

Estes resultados foram utilizados, juntamente com os dos parâmetros forçadores de tempestades, para alcançar o primeiro objetivo do presente trabalho que consistiu na determinação da vulnerabilidade a colisão e a galgamento das barreiras arenosas em estudo, com base na análise probabilística das ocorrências de máximos anuais de níveis de *run-up* ( $R_{high}$ ) para períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos multi-paramétricos, e para diferentes classes de pendora de face de praia definidas para cada secção de 100 m, ao longo de uma série temporal de 19 anos. Os máximos anuais de  $R_{high}$  para os diferentes períodos de retorno foram determinados com base na metodologia “*response approach*”, ou seja, foram obtidos a partir da própria resposta (níveis de *run-up*) ao invés de se obterem períodos de retorno associados a um parâmetro de onda ( $H_s$ ) e posteriormente se determinar os máximos anuais de  $R_{high}$  associados.

Os regimes de colisão e galgamento foram obtidos segundo a abordagem de *Sallenger* (2000), com base na interpretação da relação entre os níveis de Rhigh e os dados morfológicos de elevação das barreiras em estudo. Assumindo a notável influência das larguras de berma e de duna nas previsões dos regimes de colisão e galgamento para períodos de retorno de 5 anos, foi possível apresentar uma adaptação à abordagem de *Sallenger* através da incorporação de *Thresholds* de colisão e de galgamento, para a representação dos resultados finais de vulnerabilidade a colisão e a galgamento na zona de estudo. Verifica-se que praticamente toda a extensão de base de duna da zona de estudo é propensa a colisão, exceto nas seções que foram definidas com larguras de berma acima do *threshold* de colisão. O regime de galgamento ocorre para períodos de retorno de 5 anos em praticamente toda a extensão da zona ocidental da I. Barreta e do extremo nascente da zona oriental da I. Culatra. Em praticamente toda a extensão das zonas central da P. Ancão e oriental da I. Armona o regime de galgamento ocorre para períodos de retorno de 5 e 25 anos com algumas seções para períodos de retorno de 50 anos.

O segundo objetivo constou na determinação dos índices costeiros de erosão e de galgamento, para tempestades com períodos de retorno de 10 e 50 anos multi-paramétricos, e consequente identificação de *hotspots* de erosão e galgamento, de acordo com o método de avaliação de risco costeiro CRAF1 (*Coastal Risk Assessment Framework - Phase 1*). A análise consta em períodos multi-paramétricos, uma vez que, inicialmente, o indicador de perigo a erosão foi obtido através da estimativa dos valores de recuo máximo ao longo da zona em estudo segundo o Modelo de Convolução, desenvolvido por Kriebel e Dean (1993). Os valores de recuo máximos ( $R_{max}$ ) foram obtidos para cada secção de 100 m por tempestade de O-SO e E-SE, para as praias do flanco ocidental e oriental, respetivamente, com base nas matrizes de dados morfológicos e de níveis do mar com dados de eventos de tempestades associados, descritas anteriormente. Os resultados de recuos máximos ( $R_{max}$ ) obtidos para cada secção de 100 m por cada evento de tempestade, foram organizados, analisados e extrapolados. Este procedimento foi realizado através da análise de regressão de mínimos quadrados, para a determinação de valores de recuo máximo extremos correspondentes a períodos de retorno de 10 e 50 anos. Para esse efeito, foi seguida a metodologia descrita por Kamphuis (2010) relativamente a análises de onda de longo-prazo. A partir da qual foi possível determinar os valores de recuo máximo ( $R_{max_{PR}}$ ) para períodos

de retorno de 10 e 50 anos (casos de interesse para o presente estudo e comumente utilizados para gestão costeira em Portugal) para cada secção de 100 m ao longo da zona em estudo. Assim, os valores de  $Rmax_{PR}$  foram obtidos de acordo com a metodologia “response approach”, ou seja, foram determinados a partir da sua própria resposta (valores de recuo máximos).

Com base nos valores de recuo máximo ( $Rmax_{PR}$ ) para períodos de retorno de 10 e 50 anos foi determinado o índice de perigo de erosão na zona em estudo para períodos de retorno de 10 e 50 anos ( $i_{pE10}$  e  $i_{pE50}$ ). As classes de recuo foram distribuídas entre 0 e 5 desde recuos nulos ou muito reduzidos a recuos muito elevados.

O indicador de perigo de galgamento foi obtido a partir de uma abordagem baseada na relação de similaridade desenvolvida por Donnelly (2008). Esta abordagem foi adaptada no presente trabalho com o intuito de obter a extensão e profundidade de galgamento em cada secção de 100 m ao longo da zona de estudo tanto para 10 como 50 anos de período de retorno. Com base nos valores de profundidade de água máxima na crista da barreira durante o galgamento ( $H_c$ ), foi definido o índice de perigo de galgamento na zona em estudo para períodos de retorno de 10 e 50 anos ( $i_{pG10}$  e  $i_{pG50}$ ). As classes da profundidade de galgamento foram distribuídas entre 0 e 5 desde profundidades nulas ou muito reduzidas a profundidades muito elevadas.

A exposição de perigo recomendada por Ferreira *et al.* (2016b) e usada no presente trabalho consiste numa zona buffer com uma determinada distância desde a linha de base da duna. A distância para o perigo de erosão foi definida com base nos valores de recuo máximo obtidos no presente trabalho e para o perigo de galgamento com base nos valores de extensão de galgamento obtidos para cada secção ao longo da zona em estudo.

Os indicadores de exposição ( $i_{expG}$ ) medem a exposição, relativa a diferentes categorias de impacto, dentro da extensão de perigo dos períodos de retorno considerados (Ferreira *et al.*, 2016b; Viavattene *et al.*, 2018). No presente trabalho foram considerados os seguintes indicadores de exposição: Uso de Solo ( $i_{US}$ ), Atividade Comercial ( $i_{AC}$ ), Redes de Transporte e Acessos Públicos ( $i_{RTAP}$ ), Serviços de Utilidade Pública ( $i_{SUP}$ ) e Componente Social ( $i_{CS}$ ).

Na generalidade, a zona em estudo é caracterizada por índices costeiros de erosão e galgamento médios a baixos, com exceção da zona central da Península do Ancão, realçando-se esta como *hotspot* tanto para erosão como para galgamento para tempestades com períodos de retorno de 10 e 50 anos. Os resultados obtidos demonstram concordância com os obtidos em estudos anteriores. Contudo, foram obtidas sobrestimativas, em especial para erosão nas ilhas do flanco oriental e para galgamento na zona oriental da Ilha da Barreta e na extremidade nascente da zona oriental da Ilha da Culatra, que estão relacionadas com a origem e o processo de aquisição dos dados morfológicos. A metodologia CRAF1 demonstrou ser eficiente, sendo considerada relativamente acessível e de fácil utilização. Exige, contudo, a existência de uma base de dados ampla e com informação detalhada. Parte de algumas sobrestimativas obtidas poderão ser atenuadas através de um ajuste e atualização dos dados de entrada.

# Índice

Dedicações .....	i
Agradecimentos.....	ii
Resumo .....	iii
Abstract.....	iv
Resumo alargado .....	v
Índice.....	xi
Lista de Figuras .....	xiv
Lista de Tabelas.....	xviii
Lista de Notações .....	xx
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ENQUADRAMENTO DA ZONA DE ESTUDO.....	9
2.1 Localização geográfica e descrição da zona de estudo.....	9
2.2 Caracterização Morfológica, Ocupação Antrópica e Evolução do Litoral.....	11
2.2.1 Península do Ancão e Barra do Ancão.....	11
2.2.2 Ilha da Barreta e Barra de Faro-Olhão .....	16
2.2.3 Ilha da Culatra e Barra da Armona .....	18
2.2.4 Ilha da Armona e Barra da Fuseta.....	20
2.3 Condições Oceanográficas.....	23
2.3.1 Regime de Marés .....	23
2.3.2 Clima de Agitação Marítima .....	23
2.3.3 Tempestades.....	25
2.3.4 Sobrelevação do Nível do Mar .....	28
3. BASE DE DADOS .....	30
3.1 Introdução .....	30
3.2 Dados de Agitação Marítima .....	33
3.2.1 Aquisição de dados .....	33
3.2.2 Construção da base de dados de agitação marítima.....	35

3.3 Dados de Nível do Mar.....	45
3.3.1 Aquisição de dados .....	45
3.3.2 Construção da base de dados de nível do mar .....	46
3.4 Individualização de Eventos de Tempestades.....	47
3.5 Parâmetros Morfodinâmicos .....	50
4. POTENCIAL DE COLISÃO E DE GALGAMENTO .....	63
4.1 Introdução .....	63
4.2 Métodos.....	71
4.2.1 Níveis de Run-up máximos .....	71
4.2.2. Vulnerabilidade a Colisão e a Galgamento .....	74
4.3. Resultados .....	77
4.3.1. Níveis de <i>Run-up</i> máximos.....	77
4.3.2. Vulnerabilidade a Colisão e a Galgamento .....	81
4.4 Discussão .....	97
4.5 Conclusão.....	109
5. ÍNDICES COSTEIROS .....	113
5.1 Introdução .....	113
5.2 Índices Costeiros .....	119
5.2.1 Indicador de Perigo de Erosão .....	121
5.2.2 Indicador de Perigo de Galgamento.....	127
5.2.3 Extensão de Perigo de Erosão e de Galgamento.....	130
5.2.4 Indicadores de Exposição .....	131
5.3 Resultados .....	137
5.3.1 EROSÃO .....	137
5.3.2 GALGAMENTO .....	142
5.3.3 EXTENSÃO DE PERIGO DE EROSÃO E DE GALGAMENTO .....	145
5.3.4 INDICADORES DE EXPOSIÇÃO.....	146
5.3.5 ÍNDICES COSTEIROS DE EROSÃO E GALGAMENTO.....	154
5.4. Discussão .....	158
5.5. Conclusões .....	163
6. CONCLUSÕES GERAIS .....	165
Referências .....	171

ANEXOS.....	188
Anexo 3.I .....	188
Anexo 3.II.....	191
Anexo 3.III.....	195
Anexo 4.I .....	202
Anexo 4.II.....	206

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Ocorrências de erosão, galgamento e transposição de areias derivadas de tempestade (março de 2018) .....	4
Figura 2.1 Localização da zona costeira em estudo. Área do sistema de ilhas e penínsulas barreira da Ria Formosa desde o extremo poente da Península do Ancão ao extremo nascente da Ilha da Armona. Rosa-das-ondas com base na série temporal de dados de ondas criada no presente trabalho. Asterisco vermelho (*) – localização da bóia ondógrafo de Faro. ....	9
Figura 2.2 Localização da Península do Ancão com identificação das zonas: ocidental – desde o restaurante Maria’s até ao limite poente da praia de Faro; central – área urbanizada da Praia de Faro; e oriental – desde o limite nascente da Praia de Faro até Barra do Ancão. Circulo preto – identificação do local aproximado da realocização artificial da Barra do Ancão. ....	12
Figura 2.3 Localização da Ilha da Barreta com identificação das zonas ocidental e oriental, do Cabo de Santa Maria e da Barra de Faro-Olhão. ....	17
Figura 2.4 Localização da Ilha da Culatra com identificação das zonas ocidental e oriental, da localização das três comunidades: Farol, Hangares (segundas habitações e de veraneio) e Culatra (piscatória), e das Barras de Faro-Olhão e da Armona. ....	19
Figura 2.5 Localização da Ilha da Armona com identificação de alguns áreas relevantes, como a comunidade da Armona, delimitação entre zona ocidental e oriental, e a localização da antiga Barra da Fuseta (sinalizado a X). ....	22
Figura 2.6 Rosa-das-ondas dos dados de agitação (altura significativa (Hs; m) e direção(°)) da bóia de Faro desde 1993 a 2012. ....	24
Figura 3.1 Localização das boias ondógrafo de Faro e do Golfo de Cádiz, dos pontos SIMAR-44 e WANA, e dos marégrafos de Huelva e Bonanza (imagem de fundo adaptada da imagem de satélite “World Imagery” de acesso livre da ESRI). ....	30
Figura 3.2 Dados de altura significativa das ondas do ponto SIMAR-44 (pontos cinzentos) e da boia de Faro (asteriscos pretos) desde 10 de fevereiro de 1993 a 22 de outubro de 1995. ....	37
Figura 3.3 Dados de altura significativa das ondas do ponto WANA (pontos cinzentos) e da boia de Faro (asteriscos pretos) desde 22 de outubro de 1995 a 31 de março de 2012. ....	37
Figura 3.4 Esquema ilustrativo da sequência de divisões efetuadas às matrizes de dados de agitação. ....	38
Figura 3.5 Correlação da altura significativa das ondas entre os dados modelados de SIMAR-44 e os registos da boia de Faro (a) e entre os dados modelados de WANA e os registos da boia de Faro (b), para os casos em que a altura significativa da boia de Faro é inferior a 2,5 m. ....	40
Figura 3.6 Correlação da altura significativa das ondas entre os dados modelados de SIMAR-44 e os registos da boia de Faro (a) e entre os dados modelados de WANA e os registos da boia de Faro (b) antes e após ajuste, para os casos de Sudoeste e em que a altura significativa da boia de Faro é igual ou superior a 2,5 m. ....	41
Figura 3.7 Correlação da altura significativa das ondas entre os dados modelados de SIMAR-44 e os registos da boia de Faro (a) e entre os dados modelados de WANA e os registos da boia de Faro (b) antes e após ajuste, para os casos de Sudeste e em que a altura significativa da boia de Faro é igual ou superior a 2,5m. ....	42

Figura 3.8 Base de dados de agitação marítima (a – altura significativa das ondas (m); b – período de pico (s); e c – direção das ondas (°)) desde 10 de fevereiro de 1993 a 31 de março de 2012. ....	44
Figura 3.9 Base de dados de nível do mar (m) desde 10 de fevereiro de 1993 a 31 de março de 2012. Estações de Huelva: 10.02.1993 13h30 a 31.05.1995 19h30 – H3328; 01.09.1996 01h30 a 31.12.2008 19h30 – H3326; e 31.12.2008 22h30 a 31.03.2012 19h30 – H3329. Estação de Bonanza: 31.05.1995 22h30 a 31.08.1996 22h30 – B3332. ....	47
Figura 3.10 Variação da altura significativa das ondas (m) da boia ondógrafo de Faro durante o mês de dezembro de 1995, retirado da base de dados deste trabalho. Onde $\alpha$ (Threshold) é o valor de $H_s$ acima do qual se considera tempestade; A, B e C são eventos de tempestades; x, y e z correspondem à duração das tempestades A, B e C, respetivamente; e w é o período de tempo entre as tempestades B e C. ....	48
Figura 3.11 Esquema de perfil de praia típico com descrição de terminologias importantes utilizadas no presente trabalho (adaptado de Komar, 1976; Sorensen, 2006). Dtopo: crista da duna; Dlarg: largura da duna; Dbase: base da duna; Blarg: largura da berma; Bcrista: crista da berma; Lbm: elevação da linha de baixa-mar; hc: profundidade de fecho; PM: preia-mar; NMM: nível médio do mar; BM: baixa-mar. ....	50
Figura 3.12 Fotografia aérea de uma pequena área da Península do Ancão (zona central da praia de Faro) com representação de shapefiles de linhas longitudinais criadas para extração das elevações da linha de baixa-mar (Lbm), crista da berma (Bcrista), base da duna (Dbase) e topo da duna (Dtopo). Imagem de fundo adaptada das fotografias aéreas do LiDAR 2009. ....	52
Figura 3.13 Modelo Digital de Terreno (MDT) de uma pequena área da Península do Ancão (zona central da praia de Faro) com representação dos shapefiles de linhas longitudinais da Lbm, Bcrista, Dbase e Dtopo, dos shapefiles de pontos com espaçamento de 10 m entre si dos mesmos parâmetros morfológicos, e dos shapefiles de linhas transversais do pendor da face de praia ( $\tan \beta$ ) e das larguras da berma e duna (Blarg e Dlarg, respetivamente). Imagem de fundo adaptada dos MDTs do LiDAR 2009. ....	53
Figura 3.14 Modelo Digital de Terreno (MDT) de uma pequena área da Península do Ancão (zona central da praia de Faro) com representação da curva de nível dos 0 m NMM (Z0), shapefile de linha longitudinal da profundidade de fecho (hc), e shapefile de linhas transversais desde Z0 a hc com espaçamento de 10 m entre si (Perfis). Imagem de fundo adaptada dos MDTs do LiDAR 2011. ....	54
Figura 3.15 Fotografia aérea de uma pequena área da Península do Ancão (zona central da praia de Faro) com representação de shapefile de linha longitudinal das secções de 100 m. Caixa de Informação com dados dos parâmetros para a área 67. Imagem de fundo adaptada das fotografias aéreas do LiDAR 2009. ....	55
Figura 3.16 Fotografia aérea da Península do Ancão (LiDAR 2009) com representação de shapefiles do comprimento total e das secções de 100 m e com identificação das zonas ocidental, central e oriental. ....	56
Figura 3.17 Fotografia aérea da Ilha da Barreta (LiDAR 2009) com representação de shapefiles do comprimento total e das secções de 100 m e com identificação das zonas ocidental e oriental. ....	58
Figura 3.18 Fotografia aérea da Ilha da Culatra (LiDAR 2009) com representação de shapefiles do comprimento total e das secções de 100 m e com identificação das zonas ocidental e oriental. ....	60
Figura 3.19 Fotografia aérea da Ilha da Armona (LiDAR 2009) com representação de shapefiles do comprimento total e das secções de 100 m e com identificação das zonas ocidental e oriental. ....	62
Figura 4.1 Esquema com descrição das variáveis utilizadas para categorização dos impactos de tempestades em ilhas barreira e ilustrações dos Regimes de Impacto de Tempestades: Swash (1); Colisão (2); Galgamento (3) e Inundação (4). Dtopo: topo da duna; Dbase: base da duna; Rhigh: nível máximo de run-up; Rlow: nível mínimo de run-up (Adaptado de Sallenger, 2000 e Ciavola <i>et al.</i> , 2014). ....	69
Figura 4.2 Distribuição de probabilidade dos máximos anuais de Rhigh (m) para a classe de pendor [0.06-0.07] para condições de E-SE com reta de ajuste da função de Weibull. Os círculos correspondem às probabilidades	

de 0.8, 0.9, 0.96 e 0.98 que representam os pontos de extração dos níveis de Rhigh para períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos, respetivamente. ....79

Figura 4.3 Fotografia aérea de uma pequena área da Península do Ancão (zona central da Praia de Faro) com representação de shapefile de linha longitudinal das secções de 100 m. Caixa de Informação com dados dos parâmetros para a área 67 e respetivos resultados de níveis de Rhigh para períodos de retorno de 5, 25 e 50 anos. Imagem de fundo adaptada das fotografias aéreas do LiDAR 2009. ....82

Figura 4.4 Histograma de Casos de Sucesso (ordenadas-y positivas) e de Erro (ordenadas-y negativas) por classes de larguras de berma, para toda a zona de estudo, relativamente ao regime de colisão. Linha a tracejado indica o Threshold de colisão. ....84

Figura 4.5 Histograma de Casos de Sucesso (ordenadas-y positivas) e de Erro (ordenadas-y negativas) por classes de larguras de berma + duna, para toda a zona de estudo, relativamente ao regime de galgamento. Linha a tracejado indica o threshold de galgamento. ....85

Figura 4.6 (a) Variação longilitoral das larguras de berma (Blarg) e de berma + duna (Blarg+Dlarg) na Península do Ancão, com identificação dos Thresholds de colisão (linha a tracejado preta) e galgamento (linha a tracejado cinzenta). (b) Identificação de colisão segundo observações morfológicas (OBS), regime de colisão para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de Sallenger (PREV) e representação das secções com largura de berma superior ao Threshold de colisão (35 m) (Threshold). (c) Identificação de galgamento segundo observações morfológicas (OBS), regime de galgamento para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de Sallenger (PREV) e representação das secções com largura de berma+duna superior ao threshold de galgamento (45 m) (Threshold). ....86

Figura 4.7 (a) Variação longilitoral das larguras de berma (Blarg) e de berma + duna (Blarg+Dlarg) na Ilha da Barreta, com identificação dos thresholds de colisão (linha a tracejado preta) e galgamento (linha a tracejado cinzenta). (b) Identificação de colisão segundo observações morfológicas (OBS), regime de colisão para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de Sallenger (PREV) e representação das secções com largura de berma superior ao threshold de colisão (35 m) (Threshold). (c) Identificação de galgamento segundo observações morfológicas (OBS), regime de galgamento para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de Sallenger (PREV) e representação das secções com largura de berma+duna superior ao threshold de galgamento (45 m) (Threshold). ....87

Figura 4.8 (a) Variação longilitoral das larguras de berma (Blarg) e de berma + duna (Blarg+Dlarg) na Ilha da Culatra, com identificação dos thresholds de colisão (linha a tracejado preta) e galgamento (linha a tracejado cinzenta). (b) Identificação de colisão segundo observações morfológicas (OBS), regime de colisão para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de Sallenger (PREV) e representação das secções com largura de berma superior ao threshold de colisão (35 m) (Threshold). (c) Identificação de galgamento segundo observações morfológicas (OBS), regime de galgamento para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de Sallenger (PREV) e representação das secções com largura de berma+duna superior ao threshold de galgamento (45 m) (Threshold). ....88

Figura 4.9 (a) Variação longilitoral das larguras de berma (Blarg) e de berma + duna (Blarg+Dlarg) na Ilha da Armona, com identificação dos thresholds de colisão (linha a tracejado preta) e galgamento (linha a tracejado cinzenta). (b) Identificação de colisão segundo observações morfológicas (OBS), regime de colisão para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de Sallenger (PREV) e representação das secções com largura de berma superior ao threshold de colisão (35 m) (Threshold). (c) Identificação de galgamento segundo observações morfológicas (OBS), regime de galgamento para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de Sallenger (PREV) e representação das secções com largura de berma+duna superior ao threshold de galgamento (45 m) (Threshold). ....89

Figura 4.10 Mapa de vulnerabilidade a colisão e galgamento para períodos de retorno de 5 (vermelho), 25 (laranja) e 50 (amarelo) anos na Península do Ancão. As secções não vulneráveis são representadas pela cor branca e as secções onde a abordagem de Sallenger foi considerada sem aplicação são representadas pela cor cinzenta. O regime de galgamento é diferenciado do de colisão por uma linha a tracejado no interior das secções. Imagem de fundo adaptada das fotografias aéreas do LiDAR 2009. ....91

Figura 4.11 Mapa de vulnerabilidade a colisão e galgamento para períodos de retorno de 5 (vermelho), 25 (laranja) e 50 (amarelo) anos na Ilha da Barreta. As secções não vulneráveis são representadas pela cor branca e as secções onde a abordagem de <i>Sallenger</i> foi considerada sem aplicação são representadas pela cor cinzenta. O regime de galgamento é diferenciado do de colisão por uma linha a tracejado no interior das secções. Imagem de fundo adaptada das fotografias aéreas do LiDAR 2009. ....	93
Figura 4.12 Mapa de vulnerabilidade a colisão e galgamento para períodos de retorno de 5 (vermelho), 25 (laranja) e 50 (amarelo) anos na Ilha da Culatra. As secções não vulneráveis são representadas pela cor branca e as secções onde a abordagem de <i>Sallenger</i> foi considerada sem aplicação são representadas pela cor cinzenta. O regime de galgamento é diferenciado do de colisão por uma linha a tracejado no interior das secções. Imagem de fundo adaptada das fotografias aéreas do LiDAR 2009. ....	95
Figura 4.13 Mapa de vulnerabilidade a colisão e galgamento para períodos de retorno de 5 (vermelho), 25 (laranja) e 50 (amarelo) anos na Ilha da Armona. As secções não vulneráveis são representadas pela cor branca e as secções onde a abordagem de <i>Sallenger</i> foi considerada sem aplicação são representadas pela cor cinzenta. O regime de galgamento é diferenciado do de colisão por uma linha a tracejado no interior das secções. Imagem de fundo adaptada das fotografias aéreas do LiDAR 2009. ....	97
Figura 5.1 Esquema de resposta do Perfil de Equilíbrio em sistemas de praia com desenvolvimento de berma e duna. Onde $R_c$ - Recuo máximo; $D_{topo}$ – elevação da duna; $Z_c$ -altura da duna; $B_c$ – elevação da crista da berma; $B_{larg}$ – largura da berma; e $NivM$ – nível do mar. ....	123
Figura 5.2 Exemplo de distribuição de Weibull (W) adaptada aos dados de recuo máximo ( $R_{max}$ ) de uma secção da Península do Ancão. Com representação da respetiva reta e equação de regressão linear, a partir da qual foi possível obter os valores de $A = 0.3992$ e $B = 0.1644$ . ....	127
Figura 5.3 Esquema de uma barreira sobre a ocorrência de galgamento (adaptado de Donnelly, 2008). ....	128
Figura 5.4 Esquema demonstrando o nível de água assumido no ponto de run-up máximo e a relação linear usada para estimar a profundidade de água máxima durante o galgamento (adaptado de Schuettrumpf e Oumeraci, 2005). ....	129
Figura 5.5 Esquema ilustrativo das áreas de cada secção definidas consoante a interseção entre as zonas de buffer da extensão de erosão (a) e galgamento (b) e o tipo de uso de solo identificado. ....	133
Figura 5.6 Variação da largura de berma (m) (em cima) e de recuo máximos ( $R_{max}$ ; m) por tempestades de O-SO (em baixo) em cada secção de 100m ao longo da Península do Ancão. ....	138
Figura 5.7 Variação da largura de berma (m) (em cima) e de recuo máximos ( $R_{max}$ ; m) por tempestades de O-SO (em baixo) em cada secção de 100m ao longo da Ilha da Barreta. ....	139
Figura 5.8 Variação da largura de berma (m) (em cima) e de recuo máximos ( $R_{max}$ ; m) por tempestades de E-SE (em baixo) em cada secção de 100m ao longo da Ilha da Culatra. ....	140
Figura 5.9 Variação da largura de berma (m) (em cima) e de recuo máximos ( $R_{max}$ ; m) por tempestades de E-SE (em baixo) em cada secção de 100m ao longo da Ilha da Armona. ....	141
Figura 5.10 Índice de Perigo de Erosão para período de retorno de 10 anos ( $i_{pE10}$ ) na zona em estudo. ....	143
Figura 5.11 Índice de Perigo de Erosão para período de retorno de 50 anos ( $i_{pE50}$ ) na zona em estudo. ....	143
Figura 5.12 Índice de Perigo de Galgamento para período de retorno de 10 anos ( $i_{pG10}$ ) na zona em estudo. ....	145
Figura 5.13 Índice de Perigo de Galgamento para período de retorno de 50 anos ( $i_{pG50}$ ) na zona em estudo. ....	145
Figura 5.14 Esquema representativo da zona de buffer definida para o alcance de exposição à erosão. ....	146

Figura 5.15 Esquema representativo da zona de buffer definida para o alcance de exposição ao galgamento. ....	146
Figura 5.16 Representação espacial do indicador de Uso do Solo. ....	147
Figura 5.17 Classificação da interseção entre o indicador de exposição de Uso do Solo e a zona de buffer de extensão de erosão (1), e as zonas de buffer de extensão de galgamento para período de retorno de 10 (2a) e 50 anos (2b). ....	148
Figura 5.18 Índices de Uso do Solo ( $i_{US}$ ) para Erosão (1) e Galgamento (2a – período retorno 10 anos e 2b – período de retorno 50 anos). ....	149
Figura 5.19 Representação espacial do indicador de Atividade Comercial. ....	149
Figura 5.20 Índices de Atividade Comercial ( $i_{AC}$ ) para Erosão (1) e Galgamento (2a – período retorno 10 anos e 2b – período de retorno 50 anos). ....	150
Figura 5.21 Representação espacial do indicador de Rede de Transportes e Acessos Públicos. ....	151
Figura 5.22 Índices de Rede de Transportes e Acessos Públicos ( $i_{RTAP}$ ) para Erosão (1) e Galgamento (2a – período retorno 10 anos e 2b – período de retorno 50 anos). ....	152
Figura 5.23 Representação espacial do indicador de Utilidade Pública. ....	152
Figura 5.24 Índices de Serviços de Utilidade Pública ( $i_{SUP}$ ) para Erosão (1) e Galgamento (2a – período retorno 10 anos e 2b – período de retorno 50 anos). ....	153
Figura 5.25 Representação espacial do indicador de Componente Social. ....	154
Figura 5.26 Índices de Componente Social ( $i_{CS}$ ) para Erosão (1) e Galgamento (2). ....	155
Figura 5.27 Índice Costeiro de Erosão induzido por tempestades com período de retorno de 10 anos na Península do Ancão e Ilhas da Barreta, Culatra e Armona. ....	156
Figura 5.28 Índice Costeiro de Erosão induzido por tempestades com período de retorno de 50 anos na Península do Ancão e Ilhas da Barreta, Culatra e Armona. ....	156
Figura 5.29 Ocorrência de galgamentos consequentes de tempestade em 2011 na Praia de Faro. ....	157
Figura 5.30 Índice Costeiro de Galgamento induzido por tempestades com período de retorno de 10 anos na Península do Ancão e Ilhas da Barreta, Culatra e Armona. ....	158
Figura 5.31 Índice Costeiro de Galgamento induzido por tempestades com período de retorno de 50 anos na Península do Ancão e Ilhas da Barreta, Culatra e Armona. ....	158
Figura 5.32 Ocorrências de erosão derivadas de tempestades em 2011 na Ilha da Culatra (à esquerda) e em 2009 na antiga “comunidade” da praia da Fuseta na Ilha da Armona (à direita). ....	160
Figura 5.33 Episódio de galgamento com rutura da barreira na Praia da Fuseta, na Ilha da Armona, registado em vídeo por Ricardo Badalo “Passeios da Ria Formosa” no dia 2 de março de 2010. ....	162

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Percentagens mensais e anuais das lacunas existentes nos registos da boia ondógrafo de Faro durante a série temporal em estudo desde fevereiro de 1993 a março de 2012. ....	36
Tabela 3.2 Datas de início e duração de cada lacuna encontrada na base de dados de Faro, após correções e preenchimento da mesma com os dados modelados SIMAR-44 e WANA. ....	43

Tabela 3.3 Valores máximos, mínimos e médios da largura da berma (Blarg), largura da duna (Dlarg), base da duna (Dbase), topo da duna (Dtopo), pendora da face de praia ( $\tan \beta$ ), profundidade de fecho (hc) e distância entre a cota 0 NMM até à hc (Perfis) na zona ocidental, central e oriental da Península do Ancão. As unidades de todos os parâmetros estão em metros à exceção de $\tan \beta$ que não tem unidade pois corresponde à tangente de um ângulo. ....	57
Tabela 3.4 Valores máximos, mínimos e médios da largura da berma (Blarg), largura da duna (Dlarg), base da duna (Dbase), topo da duna (Dtopo), pendora da face de praia ( $\tan \beta$ ), profundidade de fecho (hc) e distância entre a cota 0 NMM até à hc (Perfis) na zona ocidental e oriental da Ilha da Barreta. As unidades de todos os parâmetros estão em metros à exceção de $\tan \beta$ que não tem unidade pois corresponde à tangente de um ângulo. ....	59
Tabela 3.5 Valores máximos, mínimos e médios da largura da berma (Blarg), largura da duna (Dlarg), base da duna (Dbase), topo da duna (Dtopo), pendora da face de praia ( $\tan \beta$ ), profundidade de fecho (hc) e distância entre a cota 0 NMM até à hc (Perfis) na zona ocidental e oriental da Ilha da Culatra. As unidades de todos os parâmetros estão em metros à exceção de $\tan \beta$ que não tem unidade pois corresponde à tangente de um ângulo. ....	61
Tabela 3.6 Valores máximos, mínimos e médios da largura da berma (Blarg), largura da duna (Dlarg), base da duna (Dbase), topo da duna (Dtopo), pendora da face de praia ( $\tan \beta$ ), profundidade de fecho (hc) e distância entre a cota 0 NMM até à hc (Perfis) na zona ocidental e oriental da Ilha da Armona. As unidades de todos os parâmetros estão em metros à exceção de $\tan \beta$ que não tem unidade pois corresponde à tangente de um ângulo. ....	62
Tabela 4.1 Critérios morfológicos considerados para identificação de existência ou inexistência de colisão e galgamento na zona de estudo. ....	75
Tabela 4.2 Níveis de Rhigh para períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos por classe de pendora para condições de E-SE e de O-SO. ....	80
Tabela 4.3 Valores médios de pendora de face de praia ( $\tan \beta$ ) para cada zona definida nas áreas da Península do Ancão e Ilhas da Barreta, Culatra e Armona e respetivos valores de níveis de Rhigh (m) para períodos de retorno de 5, 25 e 50 anos. ....	81
Tabela 4.4 Percentagem de secções em que as previsões de colisão e galgamento para períodos de retorno de 5 anos segundo abordagem de Sallenger correspondem ( $Prev = OBS$ ) ou não ( $Prev \neq OBS$ ) às observações morfológicas nas áreas em estudo (Península do Ancão, Ilhas da Barreta, Culatra e Armona). ....	83
Tabela 5.1 Tangente do pendora de <i>run-up</i> medido em diques segundo Schuettrumpf e Oumeraci (2005) com respetivos coeficientes de correlação (r). ....	130
Tabela 5.2 Classificação do valor de importância relativo ao uso do solo. ....	132-133
Tabela 5.3 Classificação do valor de importância relativo à atividade comercial. ....	134
Tabela 5.4 Classificação do valor de importância relativo à rede de transportes e acessos públicos. ....	135
Tabela 5.5 Classificação do valor de importância relativo aos serviços de utilidade pública. ....	135

## Lista de Notações

$R_{2\%}$  - Níveis de *run-up*

$H_s$  – Altura significativa

$T_p$  – Período de pico das ondas

$\xi$  – Número de *Iribaren* (Battjes, 1974)

$\tan \beta$  – Pendor da face de praia

$L$  – Comprimento de onda

$g$  – Aceleração da gravidade

$R_{high}$  – Níveis de *run-up* máximos

$NivM$  – Nível do mar (componente de maré astronómica prevista + níveis de *storm surge*)

IC – Índices Costeiros

$i_p$  – Indicador de perigo

$i_{expG}$  – Indicador de exposição geral

$i_{US}$  – Uso de Solo

$i_{AC}$  – Atividade Comercial

$i_{RTAP}$  – Redes de Transporte e Acessos Públicos

$i_{SUP}$  – Serviços de Utilidade Pública

$i_{CS}$  – Componente Social

$h$  – Profundidade da água

$A$  – Parâmetro empírico

$x$  – Distância ao largo

$\omega$  – Velocidade de sedimentação

$g$  – Aceleração gravítica

$R_\infty$  – Erosão dunar

$X_b$  – Largura da zona de surf/rebentação

$db$  – Profundidade de rebentação

$H_b$  – Altura de onda na rebentação

$\gamma$  – Índice de rebentação

$NivM$  – Nível do mar

$B_c$  – Elevação da crista da berma

$Z_c$  – Altura da duna

$D_{topo}$  – Elevação da crista da berma

$B_{larg}$  – Largura de berma

$T_s$  – Escala temporal de resposta do perfil

$C_1$  – Coeficiente adimensional

$R(t)$  – Erosão dependente do tempo

$\beta$  – Taxa de erosão esalo-temporal relativa à duração de tempestade

$T_D$  – Duração total de ocorrência de uma tempestade

$R_{max}$  – Recuo máximos

$F(x)$  – Função de distribuição acumulada

$X$  – Variável relativa aos recuos máximos

$P$  – Probabilidade

$Q$  – Probabilidade de excedências

$W$  – Distribuição de Weibull

$\alpha$  – Coeficiente

$\beta$  – Parâmetro relacionado com a constante A da equação da reta de regressão linear

$\gamma$  – Parâmetro relacionado com a constante B da equação da reta de regressão linear

$R_{max_{PR}}$  – recuo máximo para períodos de retorno

$\lambda$  – Número de eventos de tempestade por ano

# 1. INTRODUÇÃO

Ao longo de 950 km de litoral de Portugal continental é bastante notável a variedade morfológica em toda a sua extensão. Entre praias, arribas, zonas húmidas e costas artificializadas, a forma morfológica costeira dominante, que constitui mais de metade do litoral português, com aproximadamente 591 km, são as praias. As zonas costeiras constituídas por praias arenosas são consideradas zonas “ricas” com elevado valor económico pois dispõem de elevada diversidade e disponibilidade de recursos marinhos e costeiros (Santos *et al.*, 2001).

Na costa sul algarvia desenvolve-se o sistema lagunar da Ria Formosa que compreende uma extensão de cerca de 55 km de praias marítimas e lacustres que constituem parte da estrutura de ilhas barreira que caracteriza este sistema lagunar. Estas barreiras conferem proteção à laguna que alberga inúmeras espécies de fauna e flora com elevada importância a nível regional, nacional e até mundial (Ceia, 2009). A geomorfologia, condições climáticas e biodiversidade que a Ria Formosa dispõe faz deste sistema lagunar um lugar de bastante valor ecológico, científico, económico e social. Pelo que, devido à sua relevância a nível ambiental, foi-lhe concedido o estatuto de Reserva Natural (decreto-lei 45/78 de 2 de maio), de Parque Natural da Ria Formosa (decreto-lei 373/87 de 9 de dezembro) e de Rede Natura 2000. Sendo ainda protegida internacionalmente pelo seu enquadramento na lista de zonas húmidas de importância internacional da Convenção de Ramsar. A elevada importância ecológica da Ria Formosa, em combinação com o facto de ser protegido por um sistema de ilhas e penínsulas barreira de baixa altimetria e de ser consideravelmente explorado por diversas atividades antropogénicas classifica a Ria Formosa como, um sistema bastante complexo com potencial para ocorrência de impactos significativos derivados de alterações climáticas e de eventos de tempestades extremas de baixa frequência (Duo e Ciavola, 2015).

Os sistemas de ilhas barreira são zonas bastante sensíveis, e correspondem a cerca de 12 % da zona costeira mundial. Estes sistemas de carácter extremamente dinâmico englobam ambientes complexos que estão expostos a fenómenos de erosão derivados da ocorrência de temporais, subsidência e elevação do nível médio do mar (Carter, 1988). O interesse na

perceção e no aumento de conhecimento relativamente a todos os processos envolventes nestes sistemas costeiros complexos tem sido alvo em diversos estudos realizados por todo o mundo (*e.g.*, Otvos, 1977; Niedoroda *et al.*, 1985; Psuty, 1986; Williams *et al.*, 1987; Mendelsson *et al.*, 1991; Dingler *et al.*, 1992; Dubois, 1995; Sallenger, 2000). De forma generalista, o interesse em ilhas barreira deve-se em grande parte à sua elevada importância económica (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) por constituírem proteção a lagunas e estuários que albergam fauna e flora de valor, assim como, pela sua relevância a nível turístico-económico.

A demanda pelos recursos provenientes destes sistemas de ilhas barreira, para benefícios económicos e recreativos, conduziu à intensificação populacional nestas zonas costeiras, de forma caótica e desorganizada, sem qualquer preocupação de preservação ou manutenção da biodiversidade e dos ecossistemas costeiros aí existentes (Santos *et al.*, 2001). O que levou evidentemente ao aumento de zonas vulneráveis a intempéries e de elevado risco costeiro, ao longo das barreiras arenosas que constituem estes sistemas.

A tendência de ocupação da faixa litoral em Portugal acentuou-se a partir dos anos 80 do século XX e não se observa tendência para abrandar. Em 2001, cerca de 75 % da população portuguesa vivia na zona costeira (Santos *et al.*, 2001) e, de acordo com os resultados do Instituto Nacional de Estatística, em 2011 verificou-se um acréscimo de 10 % (INE, I.P., 2011).

De acordo com registos históricos do século XVIII a ocupação antrópica nas ilhas barreira da Ria Formosa era de índole temporária e ínfima ou, mesmo, nula (Bernardo *et al.*, 2002). Apenas no final do século XIX, tornou-se de forma permanente e mais significativa, designadamente, nas Ilhas da Culatra e Armona, como resultado das atividades de pesca da sardinha (Costa, 2000), mas sempre em zonas protegidas do mar (Bernardo *et al.*, 2002). Já na segunda metade do século XX, este cenário mudou, onde algumas comunidades (Farol e Hangares, na Ilha da Culatra, e Praia de Faro, na Península do Ancão) revelaram uma ocupação de carácter sazonal relacionada com o turismo e, subseqüentemente, com a época balnear (Bernardo *et al.*, 2002). Com os problemas de gestão deste sistema, que começaram a surgir nos anos 60 do século XX (Ceia, 2009), este ecossistema tem vindo a ser sujeito a

pressões antrópicas de diversas ordens devido, principalmente, à crescente demanda do Algarve como ponto turístico.

Muitas zonas do sistema de ilhas e penínsulas barreira da Ria Formosa foram ocupadas sem qualquer ordenamento e sem ter em conta os processos hidrodinâmicos que ocorrem naturalmente num sistema como este. A fixação de zonas por ocupação antrópica influencia todo o processo natural do próprio sistema. Contudo, a resiliência que este sistema apresenta é extraordinária, e, por vezes, as respostas que adota colocam em perigo infraestruturas e construções antrópicas fixas em zonas inadequadas, no caminho do próprio restabelecimento natural do sistema. A construção de estruturas fixas na zona superior do perfil de praia, com destruição parcial ou mesmo total do cordão dunar, refletem na truncatura do perfil de praia e consequente diminuição das cotas dunares (Ferreira *et al.*, 1997). Em consequência, em situação de temporal, com o comportamento natural do sistema de praia, é comum a destruição dessas estruturas devido à falta de sedimento resultante do rebaixamento do perfil (Ferreira *et al.*, 1997). De acordo com, Ferreira *et al.* (1997), as praias mais vulneráveis são as que padecem consequências de ações humanas derivadas de má gestão. A persistência e consistência de condições marítimas de eventos de tempestade refletem na origem de diversos impactos com consequências evidentes nestas zonas mais vulneráveis. Nos últimos anos foram recorrentes fenómenos de carisma natural que incutiram alterações na constituição do sistema da Ria Formosa e como resultado foram destruídas infraestruturas e bens materiais públicos e privados que haviam sido construídos e fixos em locais vulneráveis (Garnier *et al.*, 2017). Como exemplo, em março de 2009, a abertura natural de uma nova barra na praia da Fuseta (Ilha da Armona) com consequente destruição de dezenas de edificações e estruturas de apoio, e mais recente, em março de 2018 (Figura 1.1), fenómenos de erosão ao longo de praticamente toda a extensão da Península do Ancão, com destruição de algumas zonas com enrocamentos e ocorrência galgamentos em alguns locais.



Figura 1.1 Ocorrências de erosão, galgamento e transposição de areias derivadas de tempestade (março de 2018).

A complexidade que envolve todo o sistema lagunar da Ria Formosa é fascinante. Engloba uma diversidade de processos de desenvolvimento e evolução naturais. É um sistema que aparenta ser estático a nível global, mas a uma menor escala comporta-se de forma bastante dinâmica para que seja possível manter o equilíbrio que lhe oferece essa sua aparente estabilidade global. São vários e variados os estudos científicos que abordam este tema e que relacionam este dinamismo a causas diversas como à evolução das barras de maré (Vila-Concejo *et al.*, 2004; Pacheco *et al.*, 2008), à evolução da linha de costa (Ferreira *et al.*, 2006), deriva longilitoral (Ciavola *et al.*, 2007), aos processos de galgamento (Matias *et al.*, 2007), à formação de dunas (Gomes *et al.*, 1994), aos processos na zona interior das barreiras (Carrasco, 2006) e às ações de realimentação artificiais (Dias *et al.*, 2003).

Os fatores provavelmente com maior influência na evolução de ilhas barreira são a variação do nível do mar e a disponibilidade sedimentar (Carter, 1988). Existe uma forte interligação

entre os ambientes costeiros e o sistema climático. Um dos impactos mais relevantes das alterações climáticas nos oceanos é o aumento do nível médio do mar (NMM). As variações do NMM influenciam profundamente a geomorfologia costeira, repercutindo em alterações acentuadas ao longo do litoral com consequências drásticas tanto em zonas ecológicas naturais como em zonas ocupadas antropicamente. O aumento do NMM progressivo e a longo prazo tem sido citado como a maior causa de erosão e de danos em propriedades/infraestruturas ao longo de diversas zonas costeiras em todo o mundo (U.S. Army Corps of Engineers, 1995).

A sensibilidade dos sistemas de ilhas-barreira a variações do NMM é notável. Em Portugal, as zonas mais afetadas pela subida do NMM são os estuários e os sistemas lagunares costeiros (Ferreira *et al.*, 2001). Em situações de temporais coincidentes com marés vivas estas zonas são ainda mais suscetíveis de serem severamente galgadas ou mesmo inundadas (Gama *et al.*, 1997; Ferreira *et al.*, 2004). Assim, quaisquer planos de gestão para zonas costeiras desta índole deverão ter em conta a problemática envolvida com a subida do NMM.

Como referido anteriormente, para além da variação do NMM, outro fator influente na evolução de ilhas barreira é a disponibilidade sedimentar. O défice de fornecimento sedimentar é comum ao longo do litoral português, e a sua principal causa incide na construção de barragens nos leitos dos principais rios portugueses (Ceia, 2007). Aliado às intervenções de defesa costeira que artificializaram e cimentaram maciçamente as zonas em risco, por ser considerada a melhor opção para proteção das mesmas, as evidências de erosão foram progredindo para sotamar ao longo do litoral português (Ceia, 2007).

No sistema de ilhas e penínsulas barreira da Ria Formosa as intervenções instigadoras de erosão costeira foram a construção dos molhes da marina de Vilamoura e dos esporões de proteção costeira ao longo da praia de Quarteira e a fixação artificial das barras de Faro-Olhão e de Tavira (Ramos *et al.*, 2000). Estas intervenções deram origem a alterações significativas na deriva longilitoral, que influenciaram o balanço de trocas sedimentares em todo este sistema de ilhas e penínsulas barreira (Ramos *et al.*, 2000). A amplificação de erosão costeira derivada destas ações antrópicas, juntamente com a construção desorganizada sobre o cordão dunar frontal e com a destruição da vegetação dunar derivada do aumento do

pisoteio, repercutiu no aumento de zonas vulneráveis a galgamento ao longo do sistema de ilhas e penínsulas barreira da Ria Formosa (Ramos *et al.*, 2000).

Os impactos induzidos por eventos de tempestades evidenciam maior recorrência e magnitude nestas zonas vulneráveis. Consequentemente, os estudos de vulnerabilidade costeira funcionam como uma ferramenta essencial na identificação de locais críticos (“*hotspots*”) ao longo da zona costeira com potencial para ocorrência de fenómenos de erosão e/ou galgamento derivados de eventos de tempestades. Existem diferentes abordagens para a determinação de vulnerabilidade costeira dependendo dos processos instigadores considerados, das escalas de análise utilizadas e do tipo de vulnerabilidade considerada (e.g. Sánchez-Arcilla *et al.*, 1998; Pethick e Crooks, 2002; Ferreira, 2004; McFadden *et al.*, 2007; Youssef *et al.*, 2009). No contexto de análise de eventos de tempestades, a vulnerabilidade costeira pode ser alcançada através da definição do mecanismo forçador de diferentes maneiras, tais como, com base em condições de onda reais (Prasad *et al.*, 2009) ou em classes de tempestade (Mendoza e Jiménez, 2009).

Quando uma tempestade extrema atinge uma zona costeira arenosa produz respostas morfodinâmicas variadas que modificam rápida e significativamente a morfologia da zona costeira atingida, sendo comum e intuitivamente presumido que tempestades com maior altura de onda induzem maior impacto nas zonas costeiras. Contudo tal dedução não pode ser tomada de forma tão linear pois existem outros parâmetros que também modelam a resposta morfodinâmica da zona costeira afetada (e.g., Morton, 2002; Morton e Sallenger, 2003; Bossom e Jiménez, 2011). Os fatores influentes no tipo e magnitude das consequências que advêm do impacto de tempestades estão relacionados com os agentes forçadores, ou seja, as propriedades das tempestades (duração, altura e período das ondas, nível do mar, *storm surge*), assim como, com as zonas recetoras, ou seja, as características da zona costeira sujeita ao impacto (elevações, extensões, declives, granulometria) (Bossom e Jiménez, 2011). Nomeadamente é do conhecimento científico que um dos fatores com maior impacto erosivo durante eventos de tempestade é o nível de mar elevado derivado das sobrelevações do nível do mar de origem meteorológica (i.e. *storm surge*) (Edelman, 1968; Hughes, 1981; Steetzel, 1993). Amaroli *et al.* (2012) constataram em diversas praias arenosas ao longo da região de

Emília-Romanha, no norte de Itália, que o recuo da linha de costa e a erosão dunar são controlados principalmente pelos níveis de *storm surge* opostamente à altura de onda.

Devido à extrema complexidade do sistema lagunar da Ria Formosa, que envolve tão diversos processos, é evidente a dificuldade em qualificar e quantificar a resiliência deste meio a intempéries. Logo, é importante ter conhecimento das zonas de perigo permanente, vulneráveis a erosão e galgamento quando expostas a temporais, de forma a evitar a sua ocupação ou a tomar medidas de prevenção de impactos em zonas ocupadas. Até ao momento de início deste trabalho, são diversos os estudos existentes relacionados com vulnerabilidade costeira na zona de estudo (e.g. Matias *et al.*, 1997; Ferreira *et al.*, 1997, 2009b; Duarte *et al.*, 1999; Garcia, 2008; Ceia, 2009; Rodrigues *et al.*, 2012). Contudo, os resultados de vulnerabilidade costeira obtidos nestes estudos tiveram como foco métodos que se baseiam na utilização de períodos de retorno associados a eventos individuais caracterizados por parâmetros singulares. Nesta perspetiva, a inovação do presente trabalho surge na integração de todos os parâmetros fulcrais no cálculo do potencial de erosão e galgamento e obter, assim, índices de vulnerabilidade costeira a tempestades associadas a períodos de retorno multi-paramétricos. Ou seja, a renovação do cálculo de vulnerabilidade a erosão e galgamento costeiro associada a períodos de retorno baseados na resposta ao invés de períodos de retorno baseados num evento de tempestade com um único parâmetro. Para tal foi adotada uma abordagem probabilística, onde foi estimada a probabilidade conjunta da ocorrência de perigos (erosão ou galgamento) induzidos ao longo da costa, face aos parâmetros forçadores hidrodinâmicos e aos parâmetros recetores morfológicos. Assim, com o nível de perigo classificado, a distribuição espacial da magnitude do impacto expectável foi analisada para identificar as áreas mais potencialmente vulneráveis (“*hotspots*”).

O presente trabalho abrange dois objetivos principais. O primeiro objetivo consistiu na determinação do impacto de tempestades em termos do seu potencial de erosão e/ou galgamento no sistema de ilhas e penínsulas barreira em estudo através de análise probabilística multi-paramétrica. Para atingir este objetivo foi necessário (i) criar uma base contínua de dados de agitação marítima e de Nível Médio do Mar (NMM) de uma série temporal de 19 anos; (ii) individualizar os eventos de tempestade com orientação de O-SO e de E-SE; (iii) representar e quantificar os parâmetros morfológicos de praia imersa, praia

emersa e duna ao longo da zona de estudo; e (iv) definir os *thresholds* de larguras de berma e face de duna. O segundo objetivo constou na determinação dos Índices Costeiros de Erosão (ICE) e de Galgamento (ICG), para tempestades com períodos de retorno de 10 e 50 anos multi-paramétricos, com identificação de *hotspots* de erosão/galgamento (áreas com elevada taxa de erosão/galgamento em comparação com as zonas de praia adjacentes ou com expectativas comportamentais do sistema de praia em causa). Para alcançar este objetivo foram determinados os Indicadores de Perigo de Erosão (IPE) e de Galgamento (IPG), os Indicadores de Exposição de Erosão (IEE) e de Galgamento (IEG), e valores de recuo máximo e dos valores de extensão e potencial de galgamento, por secção de 100 m e para períodos de retorno de 10 e 50 anos, assim como, das extensões de exposição a erosão/galgamento.

Procurando oferecer uma leitura fluida do trabalho desenvolvido, de forma individual por temática, mas também interligada entre si, esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. Inicialmente, o primeiro capítulo abrange uma introdução geral alusiva às principais temáticas do trabalho, com justificação da escolha da zona de estudo e identificação dos principais objetivos adotados. O segundo capítulo procura proporcionar ao leitor conhecimento da zona de estudo, em termos morfológicos, de ocupação do litoral, das condicionantes oceanográficas e da evolução da zona costeira em estudo. O terceiro capítulo visa dar a conhecer todo o procedimento realizado para a criação da base de dados oceanográficos contínua para uma série temporal de 19 anos, fundamental para a elaboração deste trabalho, assim como, para aquisição dos parâmetros morfológicos com base nos dados do LiDAR 2009 e 2011. No quarto capítulo são descritos os meios utilizados para a determinação do impacto de tempestades em termos do seu potencial de erosão e galgamento. O quinto capítulo apresenta o trabalho desenvolvido para obter os índices costeiros de erosão e galgamento e identificação de *hotspots* na zona de estudo. No final do quarto e quinto capítulo são apresentadas discussões e conclusões alusivas aos próprios capítulos. Por último, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões gerais através da integração dos principais resultados e conclusões de todo o trabalho.

## 2. ENQUADRAMENTO DA ZONA DE ESTUDO

### 2.1 Localização geográfica e descrição da zona de estudo

A zona costeira em estudo localiza-se no Sotavento Algarvio, no sul de Portugal Continental, e corresponde a parte do sistema lagunar da Ria Formosa, mais concretamente, ao troço costeiro arenoso com aproximadamente 35 quilómetros de extensão desde o extremo poente da Península do Ancão ao extremo nascente da Ilha da Armona (Figura 2.1).

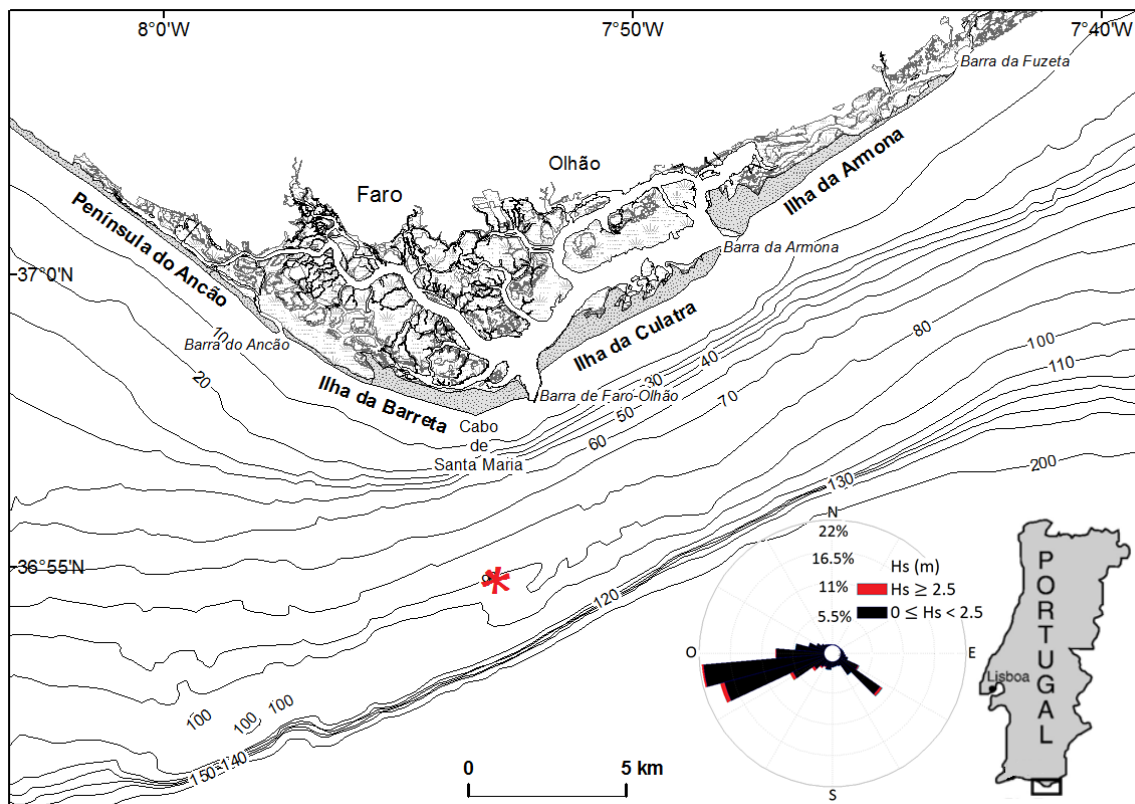


Figura 2.1 Localização da zona costeira em estudo. Área do sistema de ilhas e penínsulas barreira da Ria Formosa desde o extremo poente da Península do Ancão ao extremo nascente da Ilha da Armona. Rosa-das-ondas com base na série temporal de dados de ondas criada no presente trabalho. Asterisco vermelho (\*) – localização da bóia ondógrafo de Faro.

A configuração atual do troço costeiro em estudo compreende uma península (Península do Ancão) e três ilhas barreira (Ilhas da Barreta, Culatra e Armona) (Figura 2.1). Na área de estudo a conexão entre o sistema lagunar e o oceano realiza-se através de quatro barras de maré (Barras do Ancão, Faro-Olhão, Armona e Fuzeta) (Figura 2.1).

Partindo do extremo poente para o extremo nascente da zona de estudo, a direção da linha de costa segue uma orientação de NO-SE até ao Cabo de Santa Maria rodando a partir daqui para SO-NE, formando assim os flancos ocidental (Península do Ancão e Ilha da Barreta) e oriental (Ilhas da Culatra e Armona) da zona de estudo (Figura 2.1). A plataforma continental algarvia é caracterizada por um pendor médio aproximado de 20 m/km na zona mais estreita, em frente ao Cabo de Santa Maria, alargando-se progressivamente para Este e Oeste atingindo pendores de cerca de 5 m/km em frente ao rio Guadiana e a Albufeira (Dias, 1987). Ao longo do sistema de ilhas e penínsulas barreira da Ria Formosa os sedimentos encontrados entre os 0 e 5 m de profundidade (relativamente ao NMM) são bastante homogéneos, predominando o quartzo com 80-90 % das ocorrências. Outras partículas terrígenas são praticamente ausentes e os bioclastos representam quase 20 % da composição das areias (Rosa *et al.*, 2013; Achad *et al.*, 2014). As praias das ilhas barreira e península em estudo são constituídas maioritariamente por areias médias a grosseiras (Andrade, 1990; Matias *et al.* 2009; Achab, 2014) e são características profundidades de fecho entre os 7 e 9 m de profundidade relativamente ao NMM.

A deriva litoral efetiva, considerada como a principal fonte de fornecimento sedimentar para o sistema costeiro em estudo, tem orientação de oeste para este. Estimativas do transporte sedimentar litoral na zona em estudo variam entre  $6 \times 10^3$  e  $3 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/ano (Vila-Concejo *et al.*, 2003). A fonte de entrada no flanco ocidental, derivada da deriva litoral, apresenta uma magnitude estimada em  $1.1 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/ano (Teixeira, 2013), e é sustentada pelo fornecimento sedimentar proveniente da erosão das arribas litorais entre Olhos de Água e o Garrão e da erosão hídrica. Parte destas areias são retidas no delta de vazante da Barra de Faro-Olhão e parte destes serão perdidos na plataforma continental devido aos fundos íngremes existentes em frente ao Cabo de Santa Maria. Consequentemente, a deriva no flanco oriental será inferior à do ocidental, apesar de não haver registos da sua magnitude (Santos *et al.*, 2014).

O forte dinamismo característico dos sistemas de ilhas barreira é maioritariamente derivado de processos de remodelação constantes impulsionados pela evolução das barras de maré. Na Ria Formosa são notáveis as alterações morfológicas e realocações naturais das barras de maré, que tendencialmente migram no sentido Oeste-Este (Vila-Concejo *et al.*, 2006; Pacheco *et al.*, 2010). Atualmente, das quatro barras de maré dentro da zona de estudo, duas foram relocadas (Barra do Ancão e da Fuzeta), uma foi estabilizada artificialmente (Barra de Faro-Olhão) e apenas uma preserva a sua origem natural (Barra da Armona) (Vila-Concejo *et al.*, 2004, 2006; Ferreira *et al.*, 2016a). Aproximadamente 90 % do prisma total de maré do sistema da Ria Formosa correspondem às Barras do Ancão, Faro-Olhão e Armona. Contudo, é a Barra de Faro-Olhão que apresenta maior importância, representando 45 % e 61 % do prisma total de maré da Ria Formosa, em maré morta e maré viva, respetivamente. Factos que demonstram que a barra responsável pela circulação e troca de água na Ria Formosa é a Barra de Faro-Olhão (Pacheco *et al.*, 2010). Nos subcapítulos que se seguem irá constar uma descrição mais detalhada das referidas barras dentro do contexto com relevância para o presente trabalho.

Por último, é de importância referir que no seguimento do programa Polis Litoral Ria Formosa diversas ações de requalificação e valorização deste sistema lagunar já tomaram lugar à data deste trabalho. Dentro das quais é importante referir que foram tomadas ações de ordenamento, proteção e requalificação de zonas costeiras com objetivo de prevenção de risco na zona em estudo, nomeadamente na Península do Ancão, Ilhas da Culatra e Armona (<http://www.polislitoralriiformosa.pt/polis.php>). Nos subcapítulos seguintes serão enquadradas em cada área em estudo as mudanças efetuadas e suas consequências relevantes relativamente ao tema deste trabalho.

## **2.2 Caracterização Morfológica, Ocupação Antrópica e Evolução do Litoral**

### **2.2.1 Península do Ancão e Barra do Ancão**

Desde o extremo poente à zona central do flanco ocidental da zona de estudo desenvolve-se a barreira arenosa mais estreita (50-200 m; Matias *et al.*, 2008) em estudo, a Península do Ancão (Figura 2.2). O seu comprimento é bastante variável (de 8.5 a 12.8 km entre 1947 e

2001; Matias *et al.*, 2008; e 10 km em 2007; Achad *et al.*, 2014) devido à migração da Barra do Ancão. A extensão total da Península do Ancão assumida no presente trabalho é de 10.1 km, ao longo da qual é possível distinguir em termos morfológicos e de ocupação antrópica, três áreas distintas, definidas por zona ocidental, central e oriental (Figura 2.2).

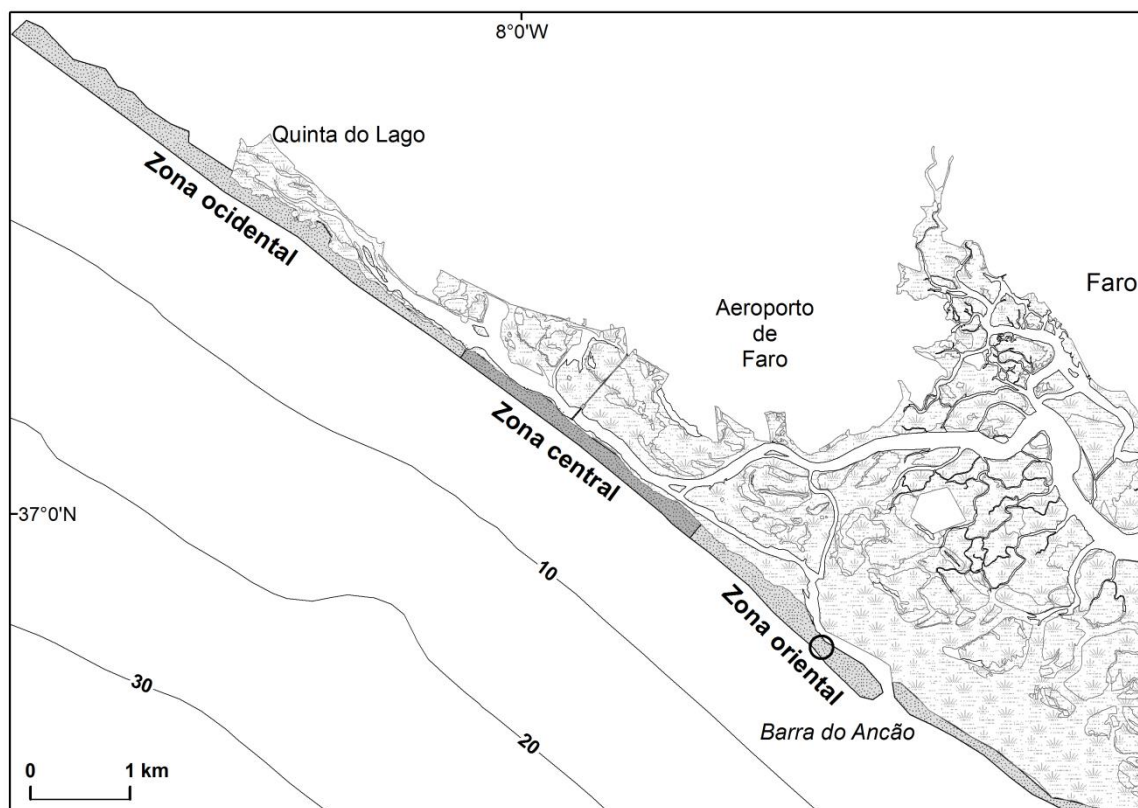


Figura 2.2 Localização da Península do Ancão com identificação das zonas: ocidental – desde o restaurante Maria's até ao limite poente da praia de Faro; central – área urbanizada da Praia de Faro; e oriental – desde o limite nascente da Praia de Faro até Barra do Ancão. Circulo preto – identificação do local aproximado da realocização artificial da Barra do Ancão.

A evidência de graus de ocupação antrópica opostos ao longo da Península do Ancão é um fator determinante na evolução desta barreira arenosa. A zona ocidental é praticamente inabitada e é caracterizada por uma crista dunar elevada (cota máxima de 9.8 m relativamente ao NMM) estável e contínua, exceto onde é interrompida localmente por alguns bares/restaurantes de praia e por passadiços de madeira que constituem os acessos pedonais para algumas concessões de praia. Nesta área é evidente uma escarpa de erosão localizada na zona de transição entre a duna e a praia, devida a um recuo da linha de costa que em média atingiu 0.8 m/ano entre 1989 e 2001 (Duarte *et al.*, 1999; Ferreira *et al.*, 2006, 2016).

Ao longo da zona central, onde está localizada a Praia de Faro, a construção de habitações, edifícios, e infraestruturas de lazer destruíram quase por completo o cordão dunar. Algumas áreas do lado externo da barreira, em contacto direto com o oceano, foram fixas e estabilizadas artificialmente por estruturas de proteção longitudinais. A construção destas proteções impediu o recuo da linha de costa (Ferreira *et al.*, 2006), contudo estas estruturas são frequentemente galgadas durante marés vivas equinociais (Matias *et al.*, 2008) ou durante condições de tempestade (Ferreira *et al.*, 2006). A ocupação antrópica com estruturas fixas ao longo da zona superior dos perfis de praia, onde supostamente seria de esperar o desenvolvimento natural da duna, causa a truncadura do perfil e rebaixamento da cota dunar, impedindo o sistema de praia de executar os processos de recuperação naturais após os eventos de tempestade. Consequentemente este facto dita a razão pelo qual se verifica ocorrência de galgamentos nestes locais, e em alguns casos com destruição de infraestruturas, durante eventos extremos de tempestades (Ferreira *et al.*, 2006). Já desde o final do século XX que se relata que a zona central da Península do Ancão é a que possui maior suscetibilidade a qualquer evento erosivo (Ferreira *et al.*, 1997), pois em consequência da excessiva ocupação antrópica é a zona que apresenta menor volume sedimentar armazenado. É ainda considerada como uma das zonas mais vulneráveis e de maior risco de todas as barreiras da Ria Formosa (Matias *et al.*, 1997; Duarte *et al.*, 1999).

A zona oriental é caracterizada por um cordão dunar menos elevado relativamente à zona ocidental (cota máxima de 7.4 m relativamente ao NMM) e apenas é habitada na zona interna da barreira, do lado lagunar, por uma comunidade de pescadores de baixa densidade populacional. Na zona frontal da barreira, do lado do oceano, a fixação natural de vegetação autóctone é indicativa de acreção (0.4 m/ano; Ferreira *et al.*, 2006) e existem evidências de formação de uma nova duna. O único local da zona oriental da Península do Ancão que é periodicamente galgado é a restinga de areia no extremo nascente devido à sua configuração topográfica caracterizada por cotas bastante baixas (Ferreira *et al.*, 2006), na ordem dos 3 m de elevação relativamente ao NMM.

Em termos morfodinâmicos, a praia que se desenvolve ao longo da Península do Ancão apresenta um comportamento refletivo, nas zonas ocidental e central, e intermediário, na zona oriental, com a formação de uma barra longilitoral durante eventos de tempestade (Martins

*et al.*, 1997; Ferreira *et al.*, 2006; Achab *et al.*, 2014). Estes comportamentos são característicos de praias com pendora intermédia a elevada. A Península do Ancão é caracterizada por pendores de face de praia entre 0.13 e 0.15, e tipicamente em média de 0.10. Em condições pós-tempestade são observados pendores de face de praia na ordem de 0.06-0.07 (Martins *et al.*, 1996; Achab *et al.*, 2014). Contudo, durante o período de Inverno são mais comuns pendores de praia intermediária (Vousdoukas *et al.*, 2012). Os pendores de face de praia nesta barreira tendencialmente decrescem para Este e, no extremo nascente, a zona oriental é caracterizada por um terraço de baixa-mar (Martins *et al.*, 1996; Vousdoukas *et al.*, 2012; Achab *et al.*, 2014). Em termos morfológicos, de acordo com a classificação de Folk (1980), a Península do Ancão é caracterizada por areias médias a muito grosseiras com  $d_{50} \sim 0.5$  mm e  $d_{90} \sim 2$  mm (Vousdoukas *et al.*, 2012; Achab *et al.*, 2014). O valor médio de média granulométrica observado na face de praia, relevante para o desenvolvimento do presente estudo, foi de 0.87 mm na Península do Ancão (Achab *et al.*, 2014).

O carácter dinâmico da Praia de Faro em combinação com os declives acentuados existentes, juntamente com o controle da maré na exposição da parte superior da face de praia à ação das ondas, mostram impor tridimensionalidade na morfologia de praia desta zona. As escarpas e os sistemas de múltiplos lobos de praia (“*beach cusps*” – daqui em diante referidos por *cusps*) de dois ou até três padrões rítmicos distintos são frequentemente observados ao longo de praticamente quase toda a extensão da praia. A formação destes *cusps* bem pronunciados salienta cotas de crista de berma bem elevadas que apresentam valores bem superiores às cotas registadas a meio da berma de praia (Vousdoukas, 2012).

Vousdoukas (2012) afirma que é mais preciso considerar que as formações de *cusps* ao longo da Península do Ancão são “reajustes” (e.g. cf. Almar *et al.*, 2008) a *cusps* existentes ao invés de assumir que estas formas surgem de uma linha costeira inicialmente reta. De uma forma generalista, os *cusps* existentes na parte inferior da face de praia, ao longo da Praia de Faro, flutuam entre dois estados: ou pertencem ao sistema maior da parte superior da face de praia ou são formações independentes que crescem tipicamente durante marés vivas e/ou em condições de onda amenas (Vousdoukas, 2012). As depressões dos *cusps* que se formam na zona central da Península do Ancão tipicamente coincidem com as localizações onde ocorre galgamento durante os eventos de tempestade. As escarpas que se formam nesta zona,

resultantes da erosão rápida das elevações transversais ou pontas dos *cusps*, chegam a atingir 2 m de altura e estão relacionadas principalmente com mudanças temporais na direção de onda dominante de SO para SE (Vousdoukas *et al.*, 2012).

Como já mencionado anteriormente, a migração e relocação das barras de maré determinam marcadamente as alterações geomorfológicas das barreiras arenosas que constituem o sistema da Ria Formosa. A relocação das barras de maré é uma abordagem de gestão costeira que consiste na abertura de uma barra numa localização dentro do seu percurso de migração natural com o objetivo de promover as trocas e qualidade de água ou por outro lado para evitar a danificação de infraestruturas. Este tipo de intervenção pode causar interrupção parcial da deriva litoral uma vez que ocorrem alterações nos padrões de acumulação/erosão nas áreas adjacentes à barra (Ferreira, 2011). Com o intuito de melhorar a circulação de água na zona ocidental do sistema lagunar da Ria Formosa, em junho de 1997, a Barra do Ancão foi relocada (localização identificada na Figura 2.2) 3.5 km para oeste relativamente à sua posição anterior (Vila-Concejo *et al.*, 2003; Ferreira *et al.*, 2016a). Após esta relocação a barra migrou para Este a uma taxa média de 80 m/ano (Pacheco *et al.*, 2007).

Com a análise das alterações morfodinâmicas observadas no extremo nascente da Península do Ancão após a relocação da Barra do Ancão em 1997, Ferreira (2011) concluiu que a ação de retenção de sedimento da deriva litoral pela barra leva à formação de bancos arenosos submersos associados ao desenvolvimento do delta de vazante. Estes bancos contribuem para o incremento da retenção de sedimento o que progressivamente com o tempo vai expandindo esta ação longitudinalmente no sentido da deriva litoral. Daqui resulta o aumento de ocorrência de terraços de baixa-mar e a diminuição do pendor de face de praia. Eventualmente, as transferências de sedimento transversais levam à acumulação de sedimento na zona de praia emersa superior desencadeando a formação e crescimento de bermas (Ferreira, 2011).

Com base nas fotografias aéreas do LiDAR 2009 utilizadas no presente trabalho a Barra do Ancão migrou entre 700 a 800 m para Este, da sua posição de relocação, desde 1997 a 2009 (Figura 2.2). No inverno de 2009/2010 a barra experienciou uma migração por “salto” (abertura natural de uma nova barra, após ocorrência de tempestade, e encerramento da barra antiga) de cerca de 300 m para Este (Ferreira, 2011).

Em 2015, após alguns meses de intervenções e dragagens tanto do lado da Península de Faro como na Ilha da Barreta, no dia 27 de novembro procedeu-se à abertura artificial da nova Barra do Ancão, com realocização para oeste relativamente à sua posição anterior. Ficando localizada a oriente das últimas casas existentes na zona oriental da Península do Ancão (a uma distância considerável de segurança), com localização geográfica próxima da posição da realocização artificial realizada em 1997 (Figura 2.2). Esta intervenção foi executada com o intuito de melhorar a circulação de água entre oceano e laguna (Ferreira *et al.*, 2016a).

### 2.2.2 Ilha da Barreta e Barra de Faro-Olhão

Na parte restante do flanco ocidental em estudo desenvolve-se a Ilha da Barreta, onde se encontra o Cabo de Santa Maria (Figura 2.3). Segundo as fotografias aéreas utilizadas para a realização do presente trabalho (LiDAR 2009), a Ilha da Barreta tem cerca de 7.9 km de extensão. No entanto, o seu comprimento é bastante variável devido à migração da Barra do Ancão e, de acordo com, Matias *et al.* (2008) desde 1947 a 2001 variou entre 5 a 9.2 km de comprimento. Tendo em conta a estabilidade ou dinamismo da própria ilha barreira, esta foi dividida em duas zonas: zona ocidental e oriental. A restinga arenosa que constitui a zona ocidental é caracterizada por forte dinamismo e é frequentemente galgada (Matias *et al.*, 2008). A zona ocidental é a zona mais estreita da I. Barreta, com larguras que rondam os 60 m, e é a zona com menor elevação (cota máxima 4 m relativamente ao NMM). Para nascente, a complexidade desta ilha barreira aumenta. A zona oriental é caracterizada por uma área bastante estável onde morfologicamente são evidentes processos de acreção. Nomeadamente, o desenvolvimento do Cabo de Santa Maria e a acumulação sedimentar no extremo nascente da ilha resultante da fixação da Barra de Faro-Olhão.

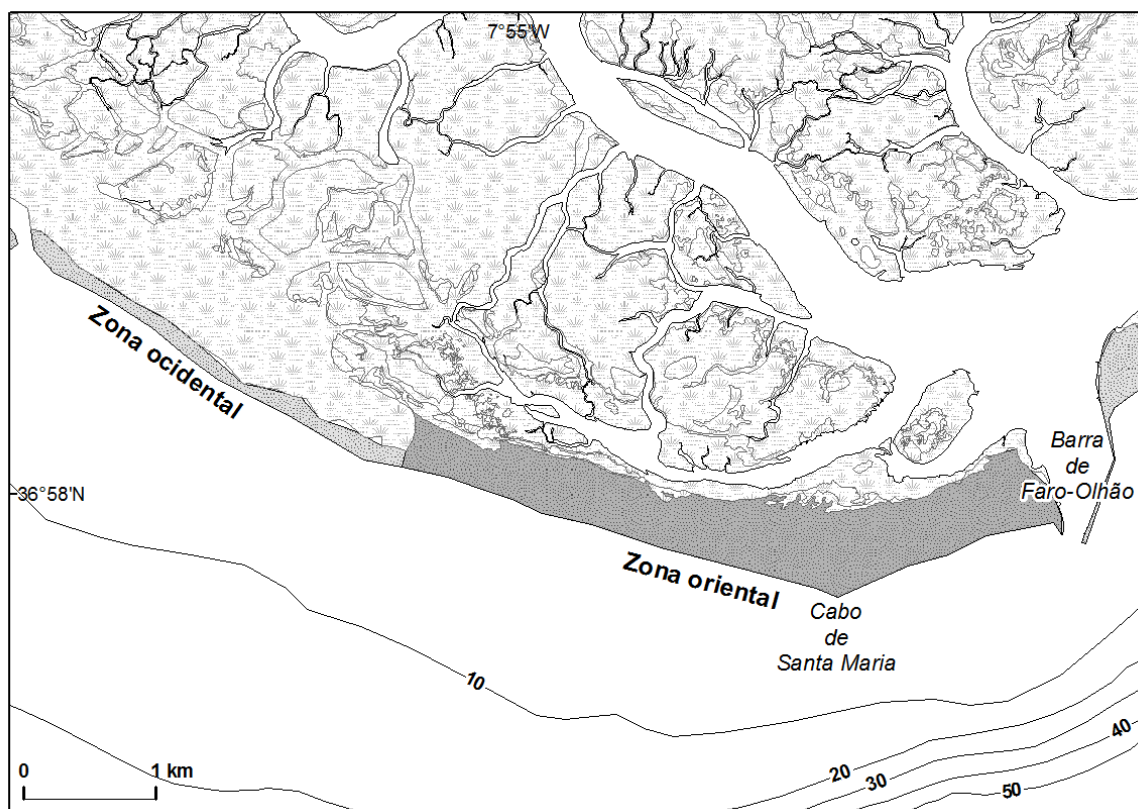


Figura 2.3 Localização da Ilha da Barreta com identificação das zonas ocidental e oriental, do Cabo de Santa Maria e da Barra de Faro-Olhão.

A restinga que se desenvolve na extremidade ocidental da Ilha da Barreta sofreu erosão após a relocação artificial da Barra do Ancão em 1997 observando-se um recuo médio da crista da barreira (*washover crest*) na ordem de 37 m desde junho de 2001 a junho de 2004 (Matias *et al.*, 2009).

Na zona oriental (Figura 2.3) a Ilha da Barreta começa a evidenciar estabilidade. Nesta zona a fixação de vegetação é consistente ao longo de um vasto campo dunar, onde por vezes é possível observar várias cristas de duna (cota máxima de 7.9 m relativo ao NMM). Nesta zona desta ilha barreira observam-se larguras mínimas de 200 m e até superiores a 650 m. A abertura e estabilização da Barra de Faro-Olhão incutiram alterações profundas tanto a jusante como a montante da sua localização. No extremo nascente da Ilha da Barreta é evidente a forte influência da fixação artificial dos molhes da Barra de Faro-Olhão pela notável acreção junto ao molhe oeste (Dias, 1988; Matias *et al.*, 2008; Ceia, 2009). Nos 12 anos seguintes à fixação da Barra Faro-Olhão verificou-se uma acreção sedimentar de cerca

de 200-220 m no extremo nascente da Ilha da Barreta (Bettencourt, 1985; Garcia *et al.*, 2010). Esta ilha é a única barreira em estudo que é praticamente inabitada. Existindo apenas na margem lagunar da zona oriental pequenas casas em madeira de apoio à pesca e um restaurante assentado sobre estruturas sobrelevadas localizado no extremo nascente da ilha.

A praia ao longo da Ilha da Barreta aproxima-se de uma praia do tipo refletiva. São característicos desta praia pendores entre os 0.10 e 0.16, e em média de 0.13. De acordo com Matias *et al.* (2009) na zona ocidental desta barreira, onde frequentemente é verificada a ocorrência de galgamentos, são característicos pendores de face de praia de 0.13 a 0.14. Granulometricamente, segundo Matias *et al.* (2009), na Ilha da Barreta são observadas, em termos médios, areias médias a grosseiras (0.43 a 0.71 mm). Na face de praia são encontradas areias grosseiras com diâmetro médio de 0.66 mm (Matias *et al.*, 2009) e 0.76 mm (Andrade, 1990). Ao longo desta barreira são frequentemente observados pontualmente a formação de *cusps* que por vezes apresentam valores de cota de crista de berma bastante próximos ou mesmo idênticos aos valores de cota da base de duna.

### 2.2.3 Ilha da Culatra e Barra da Armona

Para Este da Barra de Faro-Olhão passamos para o flanco oriental da zona de estudo onde se desenvolve primeiramente a Ilha da Culatra que apesar de ser a barreira em estudo com menor extensão, com cerca de 6.8 km, é, no entanto, a que apresenta maior densidade populacional. Existem nesta ilha três comunidades conhecidas por Culatra, Hangares e Farol (Figura 2.4). Destas, apenas a Culatra e o Farol são maioritariamente ocupadas por pescadores e respetivas famílias, e por comunidades de segunda habitação (Garnier *et al.*, 2017). A comunidade do Farol é a única localizada na zona frontal da barreira, numa área que tem sido bastante erodida devido ao aumento dos molhos de fixação da Barra de Faro-Olhão (Dias, 1988; Garcia *et al.*, 2002; Matias *et al.*, 2008).

De acordo com Garcia *et al.* (2002) entre 1958 e 1976 ocorreu um recuo de mais de 5.8 m/ano no extremo poente da Ilha da Culatra. De forma a proteger as edificações do Farol e a estabilizar a linha de costa, toda esta área foi completamente artificializada (Ceia, 2009). Para além desta zona, a I. Culatra é dominada por acreção e constituída por corpos arenosos encurvados (Dias, 1988), que refletem a alternância de cordões dunares e canais de maré

(Ceia, 2009), resultantes do estreitamento da Barra da Armona causado pela redução do prisma de maré por consequência das intervenções de engenharia realizadas na Barra de Faro-Olhão (Pacheco, 2008). A Barra da Armona segue um Padrão de Migração de Baixa-Energia (Vila-Concejo *et al.*, 2002, 2006) caracterizado pela migração da barra para Este juntamente com o desenvolvimento significativo na ilha barreira a montante (*i.e.* a extremidade nascente da zona oriental da I. Culatra) que leva à redução da largura da barra de maré. A taxa de acumulação na I. Culatra a montante da Barra da Armona foi de cerca de 52 m/ano (Dias, 1988).

No presente trabalho a I. Culatra foi dividida entre uma zona ocidental e uma zona oriental (Figura 2.4). Esta divisão resultou por se observar consideráveis variações morfológicas na constituição da própria ilha barreira, principalmente em termos de desenvolvimento da berma de praia e face de duna e caracterização do cordão dunar frontal.

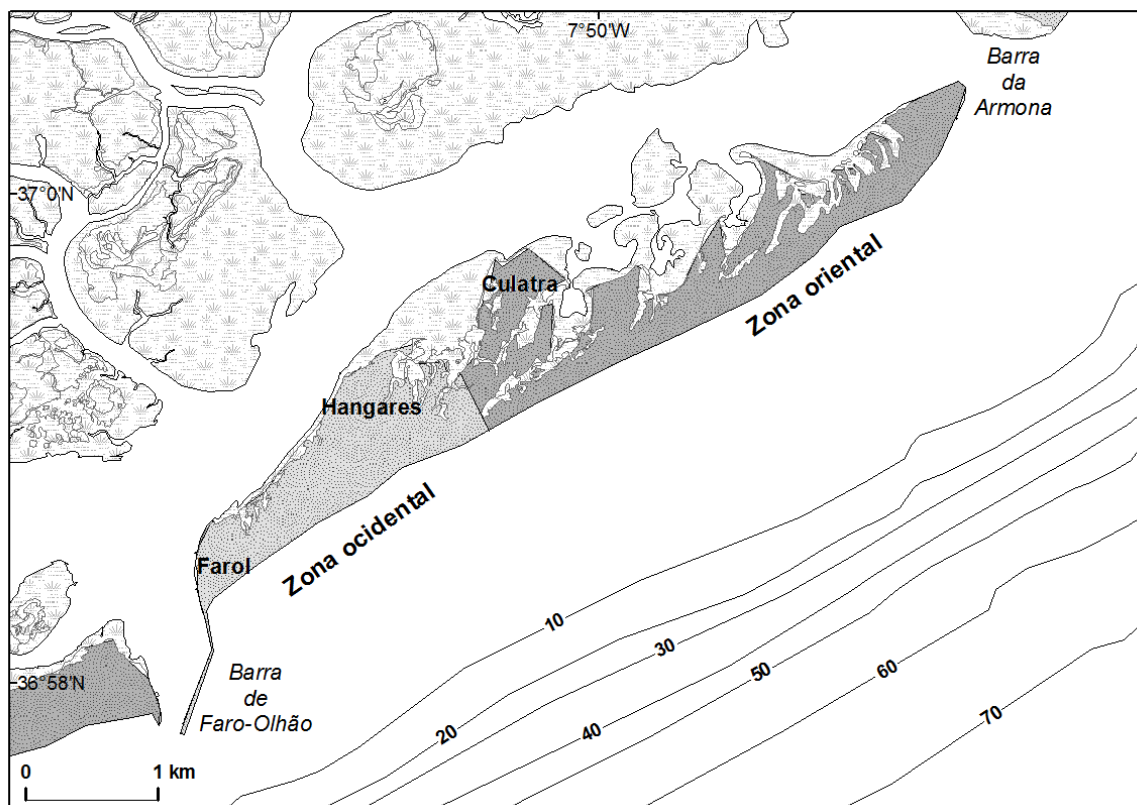


Figura 2.4 Localização da Ilha da Culatra com identificação das zonas ocidental e oriental, da localização das três comunidades: Farol, Hangares (segundas habitações e de veraneio) e Culatra (piscatória), e das Barras de Faro-Olhão e da Armona.

Os corpos dunares frontais ao longo da Ilha da Culatra desenvolvem-se de forma praticamente contínua, com algumas interrupções por trilhos de acesso à praia, e são caracterizados por dunas largas e bem vegetadas exceto no extremo nascente da zona oriental onde as dunas apresentam pouca vegetação e aparentam estar menos consolidadas. Na zona ocidental da I. Culatra existe um cordão dunar largo e extenso com poucos trilhos e boa cobertura de vegetação mantendo assim as suas características naturais (Duarte *et al.*, 1999). Os corpos dunares desenvolvidos nesta barreira atingem valores de crista de duna mais elevados na zona poente, onde ocorre a cota máxima da barreira (6.5 m relativo ao NMM) e em média a crista de duna ronda os 5.2 m de elevação relativamente ao NMM. Para nascente, na zona oriental, as elevações de crista de duna diminuem, sendo observado em média 3,9 m de elevação e a cota mínima observada é de 2.5 m, ambas relativamente ao NMM. A largura da Ilha da Culatra varia entre os 200 m até mais de 1000 m.

Em termos morfodinâmicos a praia que se desenvolve ao longo da Ilha da Culatra é do tipo intermediário, caracterizada por pendores médios a íngremes, com valores mínimos e máximos de 0.10 e 0.16, respetivamente, e médios de 0.13. Segundo estudos granulométricos realizados por Andrade (1990) a Ilha da Culatra é caracterizada por areias médias com 0.42 mm de diâmetro médio. Os sedimentos na face de praia desta ilha têm de diâmetro médio 0.29 mm (Andrade, 1990). É possível observar a formação de *cusps* ao longo desta praia, mas de forma menos pronunciada e mais esporádica relativamente às estruturas observadas nas praias das ilhas do flanco ocidental.

#### 2.2.4 Ilha da Armona e Barra da Fuseta

A última ilha barreira considerada para estudo foi a Ilha da Armona (Figura 2.5). A barra de maré que delimita esta ilha a Este, a Barra da Fuseta, é determinante na variação da extensão desta ilha. O comprimento total da I. Armona considerado para o presente estudo foi de 8.3 km com base nas fotografias aéreas do LiDAR 2009. De acordo com a variação de alguns aspetos morfológicos ao longo da ilha, principalmente em termos de largura de duna, a área a estudar foi dividida entre duas zonas: zona ocidental e oriental (Figura 2.5). De todas as ilhas barreira em estudo a I. da Armona é a mais larga, apresentando larguras máximas na ordem dos 1500 m na zona ocidental e de 350 m na zona oriental. Toda a zona ocidental da

I. Armona é caracterizada por um cordão dunar contínuo e elevado (cota máxima de 6.9 m relativo ao NMM) ao longo da linha frontal e por um areal amplo, extenso e relativamente estável na zona interior da barreira (Matias *et al.*, 2008). No início da zona oriental existia um segmento longilitoral com cerca de 400 m de comprimento (sinalizado a X na Figura 2.5), relativamente estreito, caracterizado por cotas baixas e bastante vulnerável a galgamentos. Este segmento correspondia à localização da antiga Barra da Fuseta. Ao longo deste segmento e áreas circundantes na zona da crista da duna existia um conjunto de habitações e edificações de lazer que foram destruídas na sua maioria durante os episódios de galgamento em março de 2010, consequentes da tempestade *Xynthia*. Atualmente, após requalificação desta área, apenas existem apoios de praia e de lazer das concessões existentes e após ações de realimentação as cotas verificadas neste local são mais elevadas relativamente às utilizadas neste trabalho com base no MDT derivado do LiDAR 2009.

A Barra da Fuseta segue o mesmo padrão de migração que o da Barra da Armona, ou seja, o Padrão de Migração de Baixa-Energia (Vila-Concejo *et al.*, 2002, 2006). Com a migração da barra para Este é notável o crescimento do extremo poente da I. Armona com uma taxa de acumulação sedimentar de cerca de 110 m/ano (Vila-Concejo *et al.*, 2002).

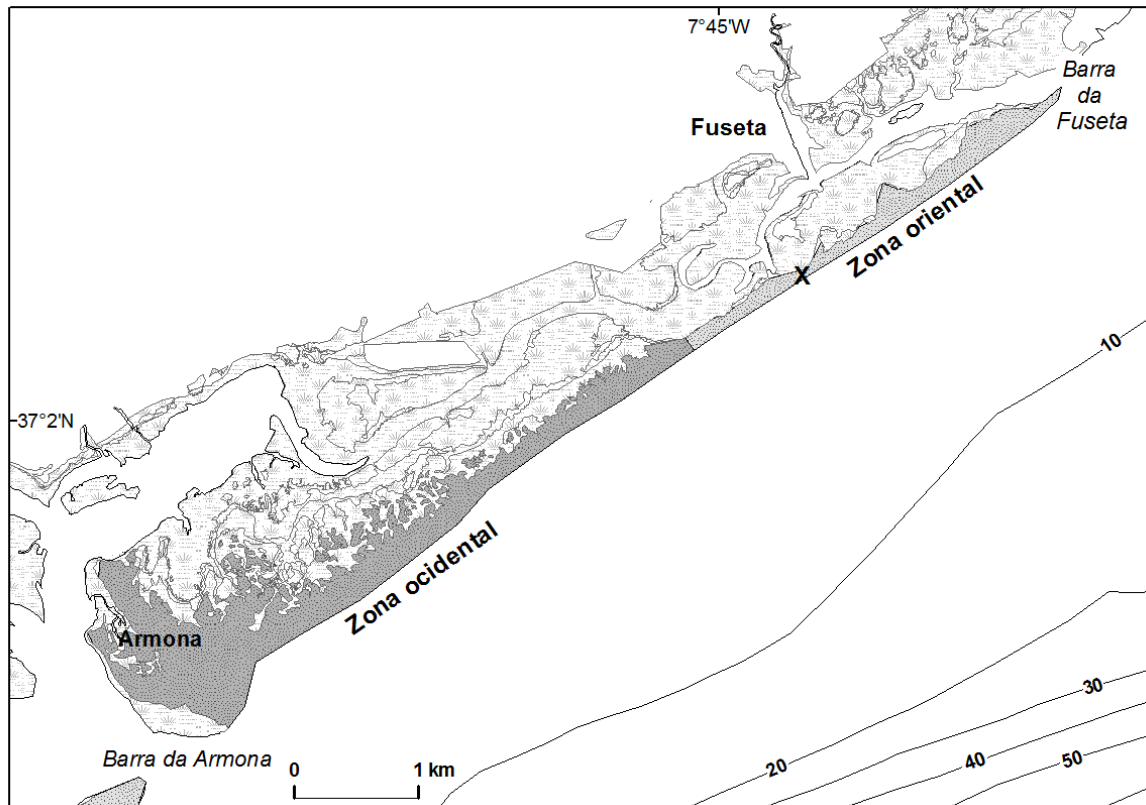


Figura 2.5 Localização da Ilha da Armona com identificação de algumas áreas relevantes, como a comunidade da Armona, delimitação entre zona ocidental e oriental, e a localização da antiga Barra da Fuseta (sinalizado a X).

A praia que se desenvolve ao longo da Ilha da Armona é caracterizada morfodinamicamente como dissipativa a intermediária, apresentando pendores suaves a médios, com valores entre 0.06 e 0.13, e em média de 0.09. Em termos granulométricos a praia Ilha da Armona é caracterizada por areia média, sendo observados, em média, sedimentos com diâmetro de 0.36 mm (Andrade, 1990). Os sedimentos encontrados na face de praia desta ilha apresentam valores de diâmetro em média de 0.32 (Achab *et al.*, 2014) e 0.50 mm (Andrade, 1990). Ao longo da praia da Armona, também é possível observar a formação de *cusps*, mas, assim como se verifica na praia da Culatra, estas estruturas são menos pronunciadas e aparecem mais esporadicamente comparativamente ao observado nas praias do flanco ocidental.

## 2.3 Condições Oceanográficas

### 2.3.1 Regime de Marés

O conhecimento preciso dos níveis de maré para estudos de erosão em zonas costeiras é de extrema importância visto que o nível para o qual ocorre um episódio de tempestade é determinante na intensidade e alcance de atuação da onda.

Ao longo de todo litoral português e, por conseguinte, na zona costeira em estudo, o regime de maré é semidiurno e em ambiente de meso-maré. De acordo com análise de dados de marés para a região de Faro disponíveis pelo Instituto Hidrográfico (IH, 2013) são previstas amplitudes médias de maré de 1.3 m, em marés mortas, e de 2.8 m, em marés vivas, podendo ser alcançados níveis de maré cheia máximos de 1.8 m acima do NMM.

### 2.3.2 Clima de Agitação Marítima

A costa sul portuguesa, graças à sua configuração geográfica, está abrigada das condições de agitação marítima mais vigorosas e predominantes na costa ocidental, nomeadamente, à ondulação proveniente de Noroeste (NO), gerada no Atlântico, e à vaga associada aos ventos locais dos quadrantes de norte. Sendo apenas condicionada por condições de agitação menos severas com direções compreendidas maioritariamente no 2º e 3º quadrante (i.e., de Este a Oeste – E-O) esta região costeira é caracterizada por um regime de agitação marítima moderado (Pires, 1989 e 1998; Costa *et al.*, 2001).

O regime de agitação ao largo na costa sul é dominado por condições de Oeste (O) e de Este (E). A influência das condições de agitação de Sudoeste (SO) e de Sudeste (SE) na costa algarvia também é notável, mas subordinada relativamente às condições dominantes (O e E), e existe predomínio da agitação de SO em relação a SE (Costa *et al.*, 2001). Com base na percentagem de ocorrências anuais na costa sul, 75 % das ocorrências correspondem a ondas de O-SO, 21 % a ondas de E-SE e os restantes 4 % a ondas de S (Costa *et al.*, 2001; Figura 2.3.2.1).

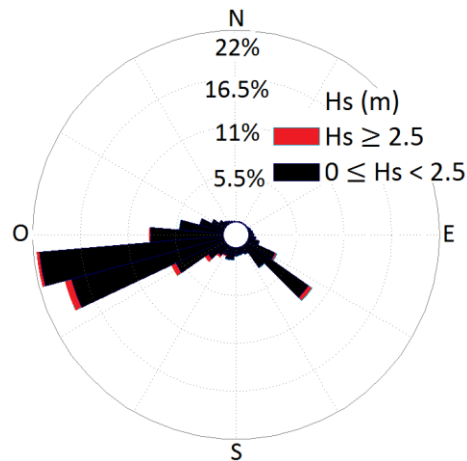


Figura 2.6 Rosa-das-ondas dos dados de agitação (altura significativa (Hs; m) e direção(°)) da bóia de Faro desde 1993 a 2012.

A configuração e orientação da zona costeira em estudo dá origem a duas zonas energeticamente distintas em termos de exposição à ação da onda. Sendo o flanco ocidental (Península do Ancão e Ilha da Barreta) o mais energético, pois é exposto diretamente às ondas dominantes e mais energéticas de O-SO, e o flanco oriental (Ilhas da Culatra e Armona) o menos energético, visto que é exposto maioritariamente à agitação moderada a menos energética de ondas de E-SE (Levante), geradas por ventos locais menos energéticos (Costa *et al.*, 2001).

De acordo com a análise de distribuição conjunta de frequência relativa de alturas significativas e períodos de pico para as classes de direção mais representativas (O, SO e SE) na costa sul algarvia, realizada por Costa *et al.* (2001), é clara a evidência da forte influência da direção nesta distribuição. Este resultado pode ser justificado pelo facto de as diferentes classes de direção de onda possuírem áreas de geração (“*fetch*”) com dimensões distintas. Nomeadamente, ondas provenientes dos sectores de O e SO têm associados períodos relativamente mais elevados refletindo *fetch* mais distantes e, por outro lado, ondas de SE com campos de geração menores têm associados períodos quase sempre inferiores a 11 s. Para além do mais, de acordo com esta distribuição conjunta observa-se que para a costa sul algarvia os valores com maior frequência são de ondas com altura significativa inferiores a 1 m (68 %), períodos de pico inferiores a 11 s (63 %) e direção de O (31 %).

Em termos de condições médias anuais o clima de agitação marítima ao largo da zona costeira em estudo é caracterizado por alturas significativa de 0.92 m e períodos de pico de 8,2 s

(Costa *et al.* 2001). Em média o valor máximo anual da altura das ondas é de 4 m (Pires, 1989).

Considerando as condições sazonais na costa sul algarvia e observando as variações ao longo do ano das médias mensais de altura significativa e período de pico, é clara a variação sazonal de todos estes parâmetros e é bem evidente a expectável ocorrência de valores máximos durante o Inverno. Em particular, para mais de 50 % das observações as alturas significativas são inferiores a 1 m, durante todo o ano à exceção do mês de dezembro (Pires, 1989; Costa *et al.*, 2001) e valores superiores a 3 m ocorrem apenas nos meses de Inverno. Quanto aos períodos de pico os valores médios variam entre 6 e 11 s e apenas se verificam valores superiores a 9 s entre dezembro e março (Costa *et al.*, 2001). Relativamente às distribuições de frequência relativa de direções durante o verão e inverno em Faro pode constatar-se que existe um acréscimo de agitação marítima proveniente do sector de O durante o verão e uma transferência de parte da agitação do sector de O para o de SO durante o inverno (Costa *et al.*, 2001).

### 2.3.3 Tempestades

Como referido anteriormente, uma vez que a costa sul portuguesa se encontra abrigada das componentes de agitação marítima mais vigorosas e dominantes na costa ocidental, toda a zona costeira sul algarvia apresenta condições de agitação marítima menos acentuadas relativamente às observadas na costa oeste (Pires, 1989 e 1998; Costa *et al.*, 2001).

A agitação de SO/O é gerada por sistemas de baixa pressão atmosférica profunda que se deslocam mais a sul do que o habitual (Almeida *et al.*, 2011a). As tempestades de SO ocorrem principalmente durante o inverno (dezembro-março), e são caracterizadas por alturas significativas entre 3 a 5 m e períodos de pico entre 7 a 11 s, podendo ocasionalmente atingir Hs ~ 7 m (Costa *et al.* 2001; Almeida *et al.*, 2011a). A agitação de SE é gerada por padrões atmosféricos de mesoescala que dão origem ao “Levante” (ventos fortes de este do Mediterrâneo), vindo do Estreito de Gibraltar, e a ondas de tempestade (Dorman *et al.*, 1995). As tempestades de SE ocorrem maioritariamente entre outubro e maio e são qualificadas por estados do mar com alturas significativas inferiores a 4 m, períodos de onda médios menores que 9 s e alturas significativas máximas registadas menores que 6 m (Pires, 1998; Costa *et*

al. 2001; Almeida *et al.*, 2011a). Associadas a condições mais severas e caracterizadas por ondas com valores de altura significativa elevados e períodos de pico longos as ondas de SO são comumente assumidas como o tipo de agitação que tem maior impacto ao atingir a costa. No entanto, as de SE, representadas por ondas com forte declividade, também provocam erosão e modificações morfológicas significativas nas praias mais expostas a este rumo (Andrade, 1990).

Uma tempestade é definida como um evento climático durante o qual a altura de onda excede um limite (“*threshold*”) durante um período de tempo mínimo específico. Até à data tem sido convencional assumir-se como temporal na costa sul algarvia todo o estado de mar para o qual se observe altura significativa igual ou superior a 3 m (Pessanha e Pires, 1981; Capitão, 1992; Carvalho, 1994; Costa *et al.*, 2001), que corresponde ao percentil anual de altura da onda (99,8 %) (Almeida *et al.*, 2011a). A agitação marítima com alturas significativas superiores a 3 m não atinge 2 % das observações e, na sua maioria, está associada à ocorrência dos maiores temporais que atingem a região costeira algarvia – as tempestades de SO (Pessanha e Pires, 1981; Pires, 1998; Costa *et al.*, 2001).

Almeida *et al.* (2011a) ao assumirem  $H_s > 3$  m como *threshold* no desenvolvimento de uma análise histórica de tempestades em Faro verificaram que, em alguns anos apenas 0.5 % das ondas observadas foram consideradas como tempestades ( $H_s > 3$  m), o que indica que este *threshold* pode não ser o mais representativo de condições de tempestade para a zona de estudo. Por outro lado, através da análise da relação entre a altura da onda ao largo e a variabilidade de perfis morfológicos na praia de Faro, Almeida *et al.* (2010) concluíram que, para se observar alterações significativas na berma e face de praia é necessário ter condições marítimas com altura significativa superior a 2.3 m. Assim, neste trabalho assumiu-se um valor de altura significativa igual ou superior a 2.5 m como *threshold*, a partir do qual se considera temporal na zona costeira em estudo. Outros autores também concluíram que este *threshold* ( $H_s > 2.5$  m) reflete a altura de onda ao largo para o qual a erosão afeta praias arenosas (Plomaritis *et al.*, 2009, 2010) e, em consequência, Rangel-Buitrago *et al.* (2011) também utilizaram  $H_s > 2.5$  m como *threshold* num estudo de caracterização de tempestades costeiras e impactos morfológicos em costas arenosas no Golf de Cádiz. Com aplicação nas

barreiras arenosas em estudo, Ferreira *et al.* (2016b) também utilizaram este valor como *threshold* para obter os eventos independentes de condições de tempestade.

Para que um evento de agitação marítima seja considerado tempestade também é necessário que se verifique que a altura significativa das ondas se mantenha acima do *threshold* definido durante um tempo mínimo de ocorrência. O tempo mínimo de duração acima do *threshold* de tempestade considerado neste estudo foi de 6 horas. A individualização dos eventos de tempestade foi feita através de um critério de independência definido pelo período de tempo entre dois eventos de tempestade independentes consecutivos (Twan, 1988; Morton *et al.*, 1997; Dorsch *et al.*, 2008; Rangel-Buitrago e Anfuso, 2011; Almeida *et al.*, 2011a), que neste estudo foi considerado de 72 horas (Ferreira *et al.*, 2016b).

Numa análise da variabilidade e relação entre o número anual de tempestades e o número anual de dias com tempestades associados à zona costeira em estudo, Almeida *et al.* (2011a) verificaram um padrão sinusoidal de variação destes parâmetros com o tempo com periodicidade de 7-8 anos. Este comportamento oscilatório, que evidencia anos com picos de valores elevados seguido por anos com depressões de valores mínimos vai de acordo com outros estudos (*e.g.* WASA, 1998; Matulla *et al.*, 2007; Ferreira *et al.*, 2009a). Apesar do padrão evidente de variações cíclicas, a variabilidade dos parâmetros de tempestade não muda significativamente ao longo do tempo, o que sugere que existe tendência para se manter o padrão sinusoidal no futuro próximo (Almeida *et al.*, 2011a).

A partir da análise de condições hidrodinâmicas associadas a impactos de tempestades de registos históricos relativos a uma zona costeira arenosa (Praia de Faro, Península do Ancão; Figura 2.2.1.1) englobada na zona em estudo, Almeida *et al.* (2012) definiram *thresholds* para os quais se verificaram impactos de tempestades. Abordagem de dados históricos permite a diferenciação da importância relativa das características de tempestade (*e.g.*, direção da onda, altura da onda, duração de tempestade) e a distinção entre o impacto (*i.e.*, danos causados por) de tempestades individuais e de grupos de tempestades (Almeida *et al.*, 2012). As tempestades individuais são mecanismos importantes para desencadear maiores alterações morfológicas, assim como, causar danos graves a estruturas costeiras (Birkemeier, 1979; Dolan and Hayden, 1981; Morton, 2002; Backstrom *et al.*, 2008). Com aplicação na zona em estudo, para tempestades individuais direcionadas de SO o *threshold* encontrado foi

de altura significativa de 4.7 m com duração de 2 dias e para tempestades de SE foi de altura significativa de 6 m e durante pelo menos 2 dias (Almeida *et al.*, 2012). A probabilidade de ocorrência anual deste tipo de tempestades individuais de SO e SE é baixa (0.32 e 0.024 respetivamente) e apresentam períodos de retorno distintos de 3.1 e 40 anos, respetivamente (Almeida *et al.*, 2012).

### 2.3.4 Sobrelevação do Nível do Mar

O conhecimento do fenómeno de sobrelevação do nível do mar (“*storm surge*”) é de extrema importância para o estudo de erosão e, conseqüentemente, vulnerabilidade costeira, uma vez que os principais episódios de erosão costeira ocorrem durante períodos de sobrelevação significativa associados a tempestades coincidentes com marés-vivas (Gama *et al.*, 1997). Este fenómeno tem vindo a ser alvo de um crescente interesse científico e, de acordo com diversas investigações precedentes, foi possível detetar a importância dos parâmetros de maré e sobrelevação em processos de erosão (e.g. Ruggiero *et al.* 2001; Fritz *et al.*, 2007; van Rijn, 2009). Justificando a sua relevância para o desenvolvimento do presente trabalho.

A sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica ocorre quando a diferença entre o nível do mar observado e o nível do mar previsto é positiva. O primeiro trabalho realizado para quantificar os registos deste fenómeno no território continental português foi o de Morais e Abecassis (1978). Após este trabalho, este fenómeno foi abordado de novo por Taborda e Dias (1992), com a publicação do primeiro estudo sistemático sobre sobrelevação em Portugal. Nesta publicação concluem que existe uma forte correlação entre *storm surge* com descidas acentuadas da pressão atmosférica e com intensidades fortes e persistentes de vento e, por outro lado, as condições oceanográficas não constituem condicionantes importantes do mesmo. Gama *et al.* (1994) analisaram estatisticamente os dados dos sete marégrafos nacionais, registados desde junho de 1986 a maio de 1988, com o intuito de caracterizar a sobrelevação do nível do mar em Portugal. Segundo os resultados obtidos, conseguiram definir 3 classes de sobrelevação (significativa, muito significativa e altamente significativa) e os níveis máximos de sobrelevação para cada estação. Para além do mais, também diferenciaram cada marégrafo em 2 grupos diferentes, consoante o nível de comportamento de sobrelevação observado. Para conhecimento e de interesse para o presente

trabalho, o marégrafo de Lagos foi enquadrado no grupo que apresentou os maiores valores de níveis de *storm surge* no geral. Em particular, para este marégrafo, foram registados um nível máximo de sobrelevação de 0.75 m e os níveis de sobrelevação para as classes significativa, muito significativa e altamente significativa foram de, respetivamente, 0.33 m, 0.43 m e 0.60 m.

Nos estudos de impactos em zonas costeiras (erosão, galgamento e inundação) é relevante o enquadramento dos níveis conjuntos de maré e *storm surge*. Diversos trabalhos de investigação realçaram a importância dos parâmetros de maré e sobrelevação do nível do mar na determinação de processos erosivos (*e.g.*, Ruggiero *et al.*, 2001; Fritz *et al.*, 2007; van Rijn, 2009) e de vulnerabilidade em zonas internas de ilhas barreira (Carrasco *et al.*, 2012, 2013). Segundo o estudo de Almeida *et al.* (2012) foi possível observar que a grande maioria dos danos reportados na Praia de Faro ocorreram durante tempestades com níveis de maré de pelo menos 1.2 m acima NMM. Também fundamental para o contexto do presente estudo, Carrasco *et al.* (2012) determinaram que os níveis associados a períodos de retorno de 1, 10 e 100 anos de, respetivamente, 2.02, 2.39 e 2.84 m acima do NMM, com base num modelo de distribuição de probabilidade e tendo em consideração os níveis conjuntos de maré e sobrelevação do nível do mar.

## 3. BASE DE DADOS

### 3.1 Introdução

O conhecimento do clima de agitação marítima e do nível do mar é de extrema importância e essencial para o estudo da vulnerabilidade costeira. A quantificação do impacto de tempestades em zonas costeiras em termos de recuo e/ou potencial de galgamento apenas é possível segundo a aplicação destes dados de agitação e nível do mar e de dados intrínsecos da zona de estudo em fórmulas empíricas.

Os trabalhos científicos com aplicação na zona costeira em estudo e para os quais foi necessária a utilização de bases de dados de ondas e de maré basearam-se, respetivamente, nos dados da boia ondógrafo de Faro, ao largo do cabo de Santa Maria (Figura 3.1), e nos dados do marégrafo de Huelva, Espanha (Lat 37.13°N Lon 6.83°W; Figura 3.1) (e.g. Almeida *et al.*, 2011b, 2012; Rodrigues, *et al.*, 2012; Vousdoukas *et al.*, 2012; Matias *et al.*, 2014).



Figura 3.1 Localização das boias ondógrafo de Faro e do Golfo de Cádiz, dos pontos SIMAR-44 e WANA, e dos marégrafos de Huelva e Bonanza (imagem de fundo adaptada da imagem de satélite “World Imagery” de acesso livre da ESRI).

A utilização de dados derivados de modelação numérica para complementar a utilização de registos reais de agitação marítima tem vindo a aumentar. Almeida *et al.* (2011a) comprovaram que existe uma boa correlação entre os dados modelados (modelo espectral de ondas de terceira geração WAVEWATCH III) e os registos da boia de Faro, onde as alturas significativas modeladas apresentam uma boa correspondência para a maioria dos registos comparados, com  $r^2$  de 0.74 e RMSE de 36 cm. Neste trabalho, a utilização de dados de agitação marítima modelados foi imprescindível e no subcapítulo 3.2 será fundamentada a viabilidade da sua utilização.

Tendo em conta a individualização de eventos de tempestades observados dentro destas bases de dados de agitação marítima, a grande maioria dos estudos desenvolvidos para caracterizar estes eventos e os seus efeitos na costa oeste e sul de Portugal (Ferreira, 2005, 2006; Ferreira *et al.*, 2006; Almeida *et al.*, 2010, 2011b, 2012) utilizam principalmente a altura significativa da onda ( $H_s$ ) com um período de retorno associado. Os períodos de retorno mais frequentemente usados e característicos para Portugal apenas têm em consideração a altura significativa da onda (Pires, 1998; Filipe, *et al.*, 1999; Costa *et al.*, 2001) e a determinação das consequências não tem em consideração uma análise com integração de outros parâmetros. Este facto salienta a importância do desenvolvimento deste trabalho.

A existência de registos do nível de mar contínuos para aplicação na zona costeira em estudo é precária. Em concreto, os dados do marégrafo de Lagos, para além das lacunas que apresentam, a sua utilização convém ser cautelosa devido a erros associados aos mesmos registos. Apesar de, este marégrafo estar em funcionamento desde 1908 apenas existem dados em formato digital a partir de abril de 2004. Para além do mais, de acordo com uma nota técnica relativamente aos dados fornecidos pela Divisão de Geodesia do Instituto Geográfico Português, o marégrafo de Lagos apresenta registos truncados durante os períodos de marés vivas extremas resultantes do assoreamento do poço e da deficiente instalação do sensor (Instituto Geográfico Português, 2012). Considerando, em alternativa, os registos do marégrafo de Faro-Olhão a resistência da sua utilização para o desenvolvimento do presente trabalho prendeu-se com o curto alcance temporal que apresentam. A série temporal utilizada neste estudo tem início no ano de 1993 e, no entanto, os primeiros registos deste marégrafo datam apenas do início do ano de 1999. Em linha com

estes factos, para o desenvolvimento do presente trabalho foi realizada uma compilação de dados do nível de mar de diferentes marégrafos como será descrito em pormenor no subcapítulo 3.3.

Para desenvolver uma análise probabilística apropriada é essencial possuir uma base de dados com registos fiáveis e diversificados, para o maior período de tempo possível, sem interrupções. Desta forma, nos subcapítulos 3.2 e 3.3 serão apresentados todos os procedimentos realizados para a criação de uma base de dados contínua com registos de parâmetros de agitação marítima (altura significativa da onda –  $H_s$  (m), período de pico –  $T_p$  (s), direção da onda –  $Dir$  (°)) e de nível do mar (nível de maré + *storm surge*, i. é, sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica) em relação ao Nível Médio do Mar (m) com frequência de 3 em 3 horas para uma série temporal de 19 anos (desde 10 de fevereiro de 1993 a 31 de março de 2012), imprescindível para o desenvolvimento deste trabalho. Este período de tempo foi assumido para análise com base nos dados disponíveis dos registos da boia de Faro à data de início do presente trabalho. Com suporte nesta base de dados foi possível realizar a individualização de eventos de tempestades, criando-se uma base com dados de ondas e de nível do mar característicos desses mesmos eventos, como será demonstrado no subcapítulo 3.4.

Os processos modeladores de zonas costeiras, tais como, os fenómenos de erosão e galgamento têm como condicionantes fatores hidrodinâmicos (ação das ondas, nível de maré, *storm surge*) mas, por outro lado, as características morfológicas da zona costeira condicionam a resposta desta à ação destes fatores. Daí o conhecimento detalhado e o mais rigoroso possível dos parâmetros morfológicos intrínsecos das barreiras arenosas em estudo é fundamental para o desenvolvimento do presente trabalho.

Diversos estudos prévios envolveram no âmbito do seu desenvolvimento a utilização de alguns dos parâmetros morfológicos também utilizados neste trabalho e abrangendo a zona de estudo (e.g. Andrade, 1990; Matias *et al.*, 1997, 2007, 2008, 2009, 2014; Garcia *et al.*, 2002, 2008; Almeida *et al.*, 2010, 2011b, 2012; Ferreira *et al.*, 2009b, 2016; Rodrigues *et al.*, 2012). No entanto, o presente trabalho distingue-se pelo detalhe utilizado na determinação de cada parâmetro morfológico, onde todos os dados foram adquiridos a cada 10 m ao longo da zona de estudo. O procedimento será descrito em detalhe no subcapítulo 3.5.

## 3.2 Dados de Agitação Marítima

### 3.2.1 Aquisição de dados

Para a criação da base de dados de agitação marítima foram utilizadas quatro fontes distintas: medições de agitação marítima das boias ondógrafo ao largo (i) de Faro (Lat 36.90°N Lon 7.90°W Profundidade 93 m; Figura 3.1) e (ii) do Golfo de Cádiz (Lat 36.49°N Lon 6.96°W Profundidade 450 m; Figura 3.1), e dados de modelação marítima do conjunto de dados (iii) SIMAR-44 e (iv) WANA (Lat 36.75°N Lon 7.75°W; Figura 3.1). Os dados (i) estão disponíveis para fins científicos, no Centro de Investigação Marinha e Ambiental (CIMA) da Universidade do Algarve (UAlg), tendo sido anteriormente requisitados ao Instituto Hidrográfico (<http://www.hidrografico.pt/>), e fornecidos pelo mesmo para o desenvolvimento de trabalhos dentro do CIMA. Os dados (ii), (iii) e (iv) foram facultados pela entidade pública espanhola *Puertos del Estado* (<http://www.puertos.es/>) mediante requisição prévia justificada pela sua necessidade para a realização do presente trabalho.

Os dados de agitação marítima ao largo de Faro são registados em tempo real por uma boia ondógrafo direcional WAVEC/Datawell. Este tipo de boias para além da aceleração vertical do movimento da superfície livre do mar, a partir do qual é possível obter a altura e período das ondas, permitem também obter informação sobre a direção de propagação das ondas assim como da temperatura da água à superfície. Os dados adquiridos pela boia são transmitidos para uma estação recetora, onde são descodificados, armazenados e passam por uma primeira filtragem de controlo de qualidade. Posteriormente, são transmitidos por *modem* para a sede do Instituto Hidrográfico onde são sujeitos a um controlo de qualidade mais rigoroso, processados e armazenados numa base de dados. Em condições normais a aquisição de dados ocorre durante 20 minutos a cada 3 horas, ao passo que, em condições de temporal os registos são a cada 30 minutos. Para cada registo são estimados a altura significativa e máxima, o período médio, máximo e de pico, e a direção média (Instituto Hidrográfico, 2013).

A boia ondógrafo ao largo do Golfo de Cádiz pertence a um conjunto de dados REDEXT, que consiste numa rede de boias fundeadas a profundidades superiores a 200 m, o que faz com que os seus registos não sejam perturbados por efeitos locais. Daí a utilização dos seus

registros ser considerada válida e representativa para extensas áreas costeiras, abrangendo assim a zona em estudo. O modelo da boia do Golfo de Cádiz é do tipo SeaWatch que tanto mede dados de ondas (altura significativa, período médio, período de pico, altura máxima, período associado à altura máxima, direção média, direção média no pico de energia, dispersão da direção no pico de energia e espectros de direções) como parâmetros atmosféricos (velocidade e direção média do vento, temperatura e pressão do ar) e oceanográficos (velocidade e direção média da corrente, temperatura da água e salinidade). É importante referir que esta boia apenas dispôs de sensor direcional a partir do ano de 2003. Todos os parâmetros de onda, atmosféricos e oceanográficos calculados pela boia são transmitidos em tempo real por satélite e recebidos pelos *Puertos de Estado*. Esta entidade garante através de um controlo de qualidade complementar que todos os registos disponíveis são obtidos corretamente e considerados viáveis (Puertos del Estado, 2015).

Tanto o conjunto de dados modelados SIMAR-44 como WANA consistem em séries temporais de parâmetros atmosféricos e oceanográficos procedentes de modelação numérica de alta resolução. As séries WANA são procedentes do sistema de previsão do estado do mar que a entidade *Puertos del Estado* desenvolveu em colaboração com a Agência Meteorológica do Estado Espanhol (AEMET, [www.aemet.es](http://www.aemet.es)). Não obstante, estes dados não são de previsão, mas sim dados de diagnóstico ou análise. Isto supõe que, para cada instante, o modelo proporciona campos de vento e pressão consistentes com a evolução dos parâmetros modelados anteriormente e com as observações realizadas. As simulações de agitação marítima do conjunto SIMAR-44 para a zona do mediterrâneo foram realizadas pelos *Puertos del Estado* no seguimento do projeto Europeu HIPOCAS (“Hindcast of Dynamics Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe”). No entanto, as simulações para todo o domínio do Oceano Atlântico foram realizadas independentemente pela entidade *Puertos del Estado*. No conjunto WANA, os dados de ondas foram modelados através dos modelos espectrais de terceira geração WAM e WaveWatch, alimentados pelos dados de ventos obtidos segundo o modelo atmosférico HIRLAM. Para a modelação dos dados oceanográficos e atmosféricos do conjunto SIMAR-44 foi utilizado apenas o modelo numérico WAM. Para cada ponto simulado, tanto do conjunto de dados SIMAR-44 como do de WANA, estão disponíveis dados de nível de maré, agitação marítima (altura significativa, período de pico, período médio, direção média) e atmosféricos (velocidade e direção média

do vento) com frequência de 3 horas (Puertos del Estado, 2010 e 2012a). Neste trabalho, foram escolhidos os dois pontos (referências 1048047 e 1049047) dos conjuntos SIMAR-44 e WANA mais próximos da localização da boia ondógrafo de Faro e foram comparados individualmente com os dados da boia de Faro. Foi escolhido o ponto SIMAR-44 e WANA com referência 1049047 (representado por ponto SIMAR-44 e WANA na Figura 3.1) visto que foi o que apresentou melhor ajuste aos dados reais. Em anexo são apresentadas as análises destes resultados em detalhe (ANEXO 3.I).

### 3.2.2 Construção da base de dados de agitação marítima

Numa análise inicial aos registos da boia ondógrafo de Faro foi possível destacar as lacunas existentes nestes dados derivadas de inoperacionalidade da própria boia (casos em que a boia foi retirada para reparação ou substituição, ou deslocada por causas naturais – tempestades marítimas, ou por Ação do homem – abalroamento) ou de dificuldades de comunicação telemétrica entre a boia e o recetor terrestre.

Pela análise das percentagens mensais das lacunas da boia de Faro ao longo da série temporal em estudo (Tabela 3.1) pode verificar-se que as maiores percentagens ocorrem nos meses de Inverno principalmente no início da série temporal, nomeadamente desde 1993 a 1999. Inclusive, para alguns destes meses, as lacunas correspondem a 100 % das observações, ou seja, não existem quaisquer registos. Segundo as percentagens anuais (Tabela 3.1), desde 1993 a 1999 a percentagem de lacunas é sempre superior a 40 % dos registos anuais e inclusive no ano de 1998 apenas foram obtidos 25 % dos registos esperados.

Tabela 3.1 Percentagens mensais e anuais das lacunas existentes nos registos da boia ondógrafo de Faro durante a série temporal em estudo desde fevereiro de 1993 a março de 2012.

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janeiro	-	44	<b>100</b>	22	15	<b>77</b>	18	8	0	0	0	0	2	3	9	8	4	29	2	0
Fevereiro	25	0	41	<b>100</b>	20	<b>78</b>	13	0	0	0	28	17	5	0	0	3	1	38	9	0
Março	<b>65</b>	29	2	0	6	<b>77</b>	<b>80</b>	14	0	4	2	6	0	0	0	<b>100</b>	0	48	2	0
Abril	4	7	0	0	12	<b>76</b>	<b>80</b>	3	0	0	0	12	3	0	0	48	3	0	5	-
Maiο	0	1	1	1	38	<b>87</b>	<b>75</b>	8	0	0	3	12	15	0	0	0	2	35	1	-
Junho	5	9	<b>79</b>	13	2	<b>78</b>	<b>76</b>	0	3	0	1	<b>57</b>	0	0	14	1	20	0	0	-
Julho	71	10	<b>100</b>	<b>50</b>	0	<b>77</b>	<b>63</b>	2	23	2	3	22	2	13	14	0	0	2	0	-
Agosto	<b>100</b>	12	<b>100</b>	<b>52</b>	<b>96</b>	<b>60</b>	<b>76</b>	0	2	6	0	9	0	<b>100</b>	0	0	0	0	2	-
Setembro	<b>100</b>	<b>100</b>	43	<b>56</b>	9	<b>75</b>	<b>75</b>	0	2	7	0	29	0	0	0	1	0	0	4	-
Outubro	<b>100</b>	<b>100</b>	2	<b>54</b>	3	<b>50</b>	<b>77</b>	2	11	1	0	22	0	0	0	0	0	0	1	-
Novembro	<b>100</b>	<b>100</b>	38	<b>59</b>	0	<b>77</b>	<b>75</b>	0	3	2	0	49	0	0	0	1	5	8	0	-
Dezembro	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>73</b>	9	<b>85</b>	<b>77</b>	19	8	0	1	27	4	74	0	3	27	3	0	-
Anual	<b>62</b>	<b>43</b>	<b>47</b>	<b>40</b>	<b>18</b>	<b>75</b>	<b>66</b>	5	4	2	3	<b>22</b>	3	<b>16</b>	3	<b>14</b>	5	<b>14</b>	2	0

Com base nestes resultados e tendo em conta a importância da utilização de uma base de dados contínua com registos fiáveis em estudos probabilísticos, a colmatação destas lacunas foi imprescindível. Para atingir este propósito, foram utilizados os dados de modelação numérica do ponto SIMAR-44 e WANA e os dados de agitação marítima da boia do Golfo de Cádiz após a sua validação. Com o apoio de um *software* de cálculo numérico, o MATLAB r2007b®, foi desenvolvido um script com comandos para executar a correlação entre os registos de ondas e os dados modelados, que serão descritos em pormenor nos parágrafos seguintes.

Os dados modelados disponíveis do ponto SIMAR-44 e WANA cobriram períodos diferentes relativamente à série temporal dos registos de ondas da boia ondógrafo de Faro utilizada neste trabalho. Como referido e explicado anteriormente, assumiu-se para análise neste trabalho o período entre 10 de fevereiro de 1993 a 31 de março de 2012. Os dados do ponto SIMAR-44 cobriram desde a data inicial da série temporal até ao dia 22 de outubro de 1995 (Figura 3.2) e os dados do ponto WANA cobriram desde o dia 22 de outubro de 1995 até à data final da série temporal (Figura 3.3).

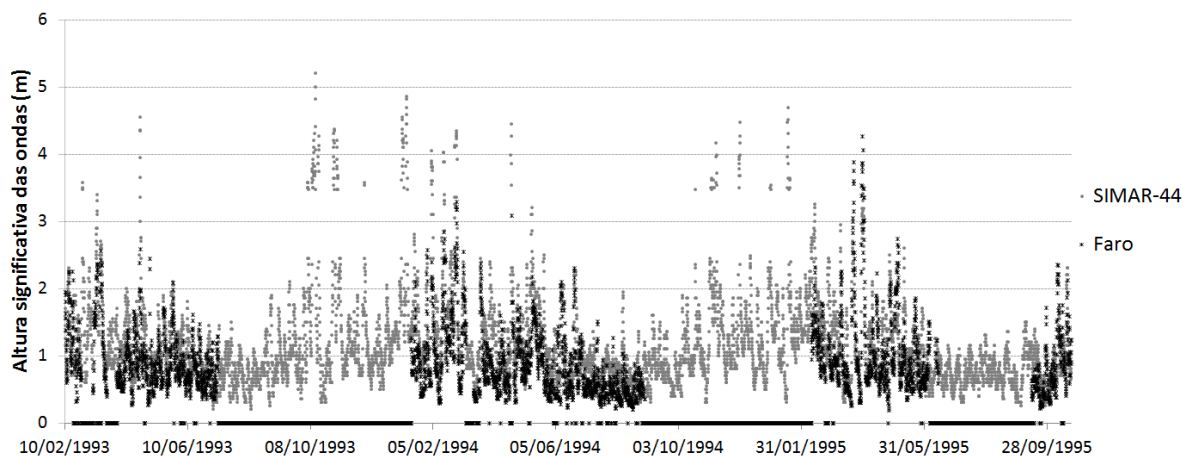


Figura 3.2 Dados de altura significativa das ondas do ponto SIMAR-44 (pontos cinzentos) e da boia de Faro (asteriscos pretos) desde 10 de fevereiro de 1993 a 22 de outubro de 1995.

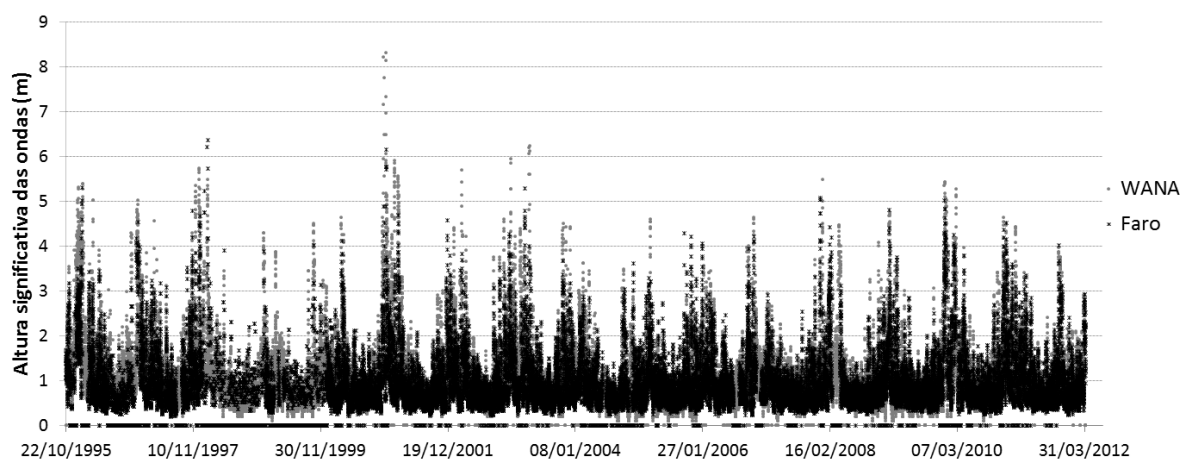


Figura 3.3 Dados de altura significativa das ondas do ponto WANA (pontos cinzentos) e da boia de Faro (asteriscos pretos) desde 22 de outubro de 1995 a 31 de março de 2012.

Por conseguinte, tendo em conta os dados disponíveis, foram criadas duas matrizes com dados regulares de 3 em 3 horas de altura significativa, período de pico, direção e respetivas datas de ocorrência (ano, mês, dia, hora, minutos e segundos). Uma matriz **SIMAR\_Faro** (Figura 3.4) com os dados modelados SIMAR-44 e os registos de Faro desde as 13h30 do dia 10 de fevereiro de 1993 às 13h30 do dia 22 de outubro de 1995, e outra matriz **WANA\_Faro** (Figura 3.4) com os dados modelados WANA e os registos de Faro desde as 16h30 do dia 22 de outubro de 1995 às 19h30 do dia 31 de março de 2012.

Para facilitar a análise, e tendo em conta a definição do limite para o qual se considera tempestade na costa sul algarvia ( $H_s \geq 2,5$  m) já mencionado anteriormente, cada uma destas

duas matrizes de dados foi dividida em casos para os quais se verifica que a altura significativa da boia de Faro ( $Hs\_Faro$ ) é inferior a 2,5 m e em casos para os quais se verifica que  $Hs\_Faro$  é igual ou superior a 2,5 m. Deste processo resultaram, no total, quatro matrizes. Duas matrizes com os dados de **SIMAR\_Faro**: uma com os dados que correspondem aos casos em que  $Hs\_Faro < 2,5$  m (**SIMAR\_FaroInf2,5**) e outra matriz com os dados que correspondem aos casos em que  $Hs\_Faro \geq 2,5$  m (**SIMAR\_FaroSup2,5**); e duas matrizes com os dados de **WANA\_Faro**: uma com os dados que correspondem aos casos em que  $Hs\_Faro < 2,5$  m (**WANA\_FaroInf2,5**) e outra matriz com os dados que correspondem aos casos em que  $Hs\_Faro \geq 2,5$  m (**WANA\_FaroSup2,5**) (Figura 3.4).

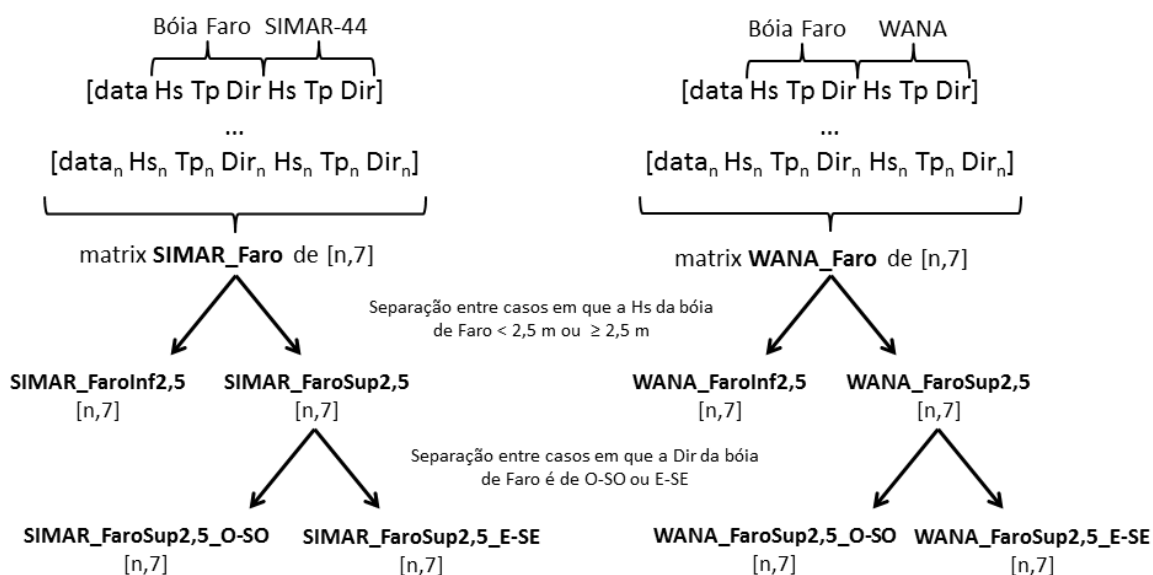


Figura 3.4 Esquema ilustrativo da sequência de divisões efetuadas às matrizes de dados de agitação.

As duas matrizes dos dados com os casos em que  $Hs\_Faro \geq 2,5$  m (**SIMAR\_FaroSup2,5** e **WANA\_FaroSup2,5**) foram subdivididas de novo consoante a direção de agitação marítima dos registos da boia de Faro. Os casos que contém predominantemente todas a agitação dominante de oeste ou sudoeste ( $180-360^\circ$ ) foram individualizados nas matrizes **SIMAR\_FaroSup2,5\_O-SO** e **WANA\_FaroSup2,5\_O-SO** (Figura 3.4). As matrizes **SIMAR\_FaroSup2,5\_E-SE** e **WANA\_FaroSup2,5\_E-SE** (Figura 3.4) contém os casos em que a agitação dominante é predominantemente de este ou sudeste ( $0-180^\circ$ ). Finalizando assim, com um total seis matrizes de dados de altura significativa, período de pico e direção para analisar: duas matrizes para os casos em que  $Hs\_Faro < 2,5$  m (**SIMAR\_FaroInf2,5** e

WANA\_FaroInf2,5; Figura 3.4) e quatro para os casos em que  $H_s\text{ Faro} \geq 2,5$  m (SIMAR\_FaroSup2,5\_O-SO, SIMAR\_FaroSup2,5\_E-SE, WANA\_FaroSup2,5\_O-SO e WANA\_FaroSup2,5\_E-SE; Figura 3.4).

Com base nestas seis matrizes finais e, segundo a utilização de uma ferramenta interativa de ajuste de curvas dentro do MATLAB r2007b®, designada por *cftool*, foi possível proceder à aplicação de um modelo estatístico linear generalizado, a regressão linear, em relação aos dados, e obter as retas e equações de regressão linear com os respetivos valores de coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e erro padrão da estimativa (RMSE) relativamente a cada parâmetro das ondas e correlacionando sempre entre dados modelados e os coincidentes registos reais. De acordo com a análise destas correlações foi determinada a viabilidade da utilização direta ou a necessidade de aplicação de equações de transferência aos dados modelados para posterior preenchimento das lacunas dos dados da boia de Faro.

Segundo os resultados das correlações entre os valores de altura significativa das ondas ( $H_s$ , m) modelados de SIMAR-44 e WANA e os registos da boia de Faro, para os casos em que a altura significativa das ondas da boia de Faro é inferior a 2,5 m, é possível verificar uma boa correlação entre os dados modelados e medidos, em ambos os casos. Não obstante, existe melhor correlação entre os dados de WANA e da boia de Faro visto que se observa um valor superior de  $r^2$  e inferior de RMSE em relação aos de SIMAR. Uma vez que os valores do declive das retas de ajuste são iguais ou muito próximos de 1 (WANA\_Faro:  $m = 1,016$  e SIMAR\_Faro:  $m = 0.9594$ ) a tendência de comportamento dos dados modelados e medidos é muito similar. De acordo com estes resultados, os dados modelados foram diretamente utilizados, sem quaisquer reservas, para preencher as lacunas da boia de Faro (Figura 3.5).

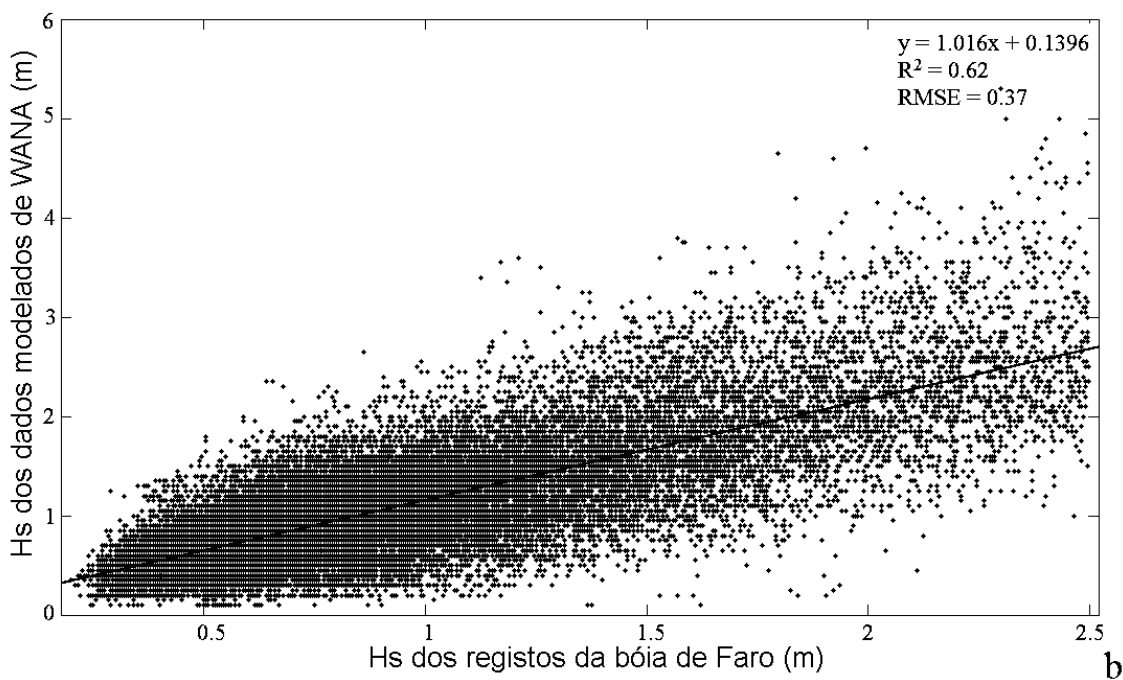
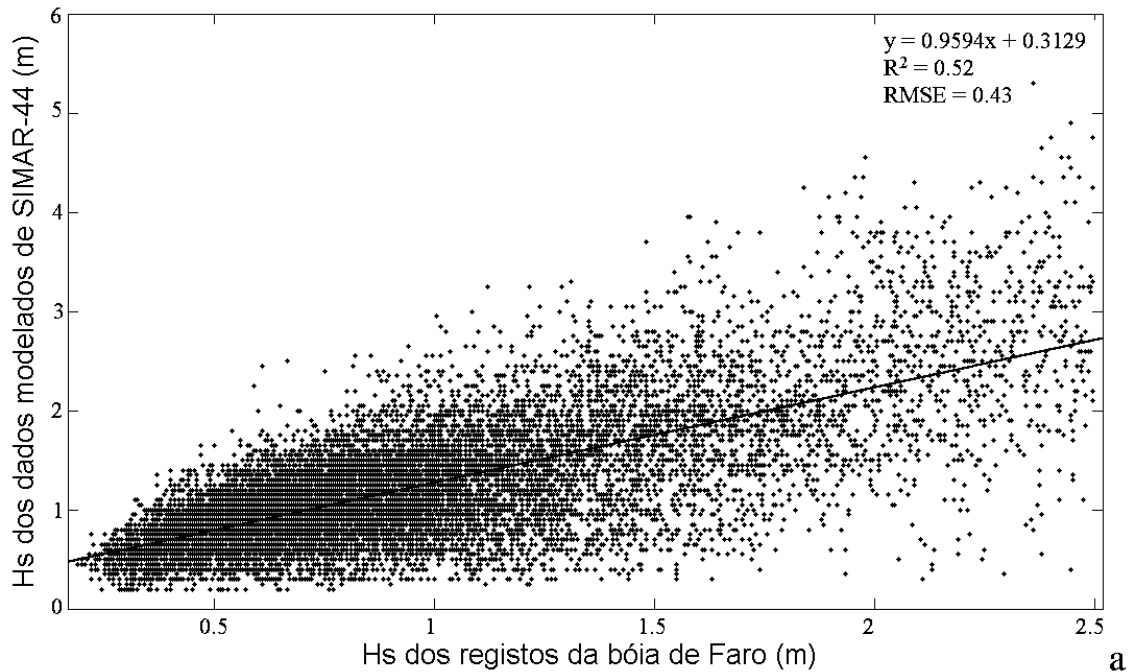


Figura 3.5 Correlação da altura significativa das ondas entre os dados modelados de SIMAR-44 e os registos da boia de Faro (a) e entre os dados modelados de WANA e os registos da boia de Faro (b), para os casos em que a altura significativa da boia de Faro é inferior a 2,5 m.

Para os casos em que a altura significativa das ondas da boia de Faro é igual ou superior a 2,5 m, as correlações obtidas entre os dados modelados de SIMAR-44 e WANA e os medidos da boia de Faro tanto para sudoeste (Figura 3.6) como para sudeste (Figura 3.7) foram fracas.

No entanto, os valores dos declives das retas lineares são muito próximo de 1 do qual se pode admitir que existe similaridade entre os comportamentos dos dados medidos e modelados. Assim, os dados de altura significativa modelados foram ajustados aos registos da boia de Faro com base nas equações de regressão linear originais obtidas para cada caso (Figuras 3.6 e 3.7). Após este procedimento pode verificar-se que os valores de RMSE diminuem significativamente para todos os casos indicando melhoria na relação entre os dados modelados e medidos.

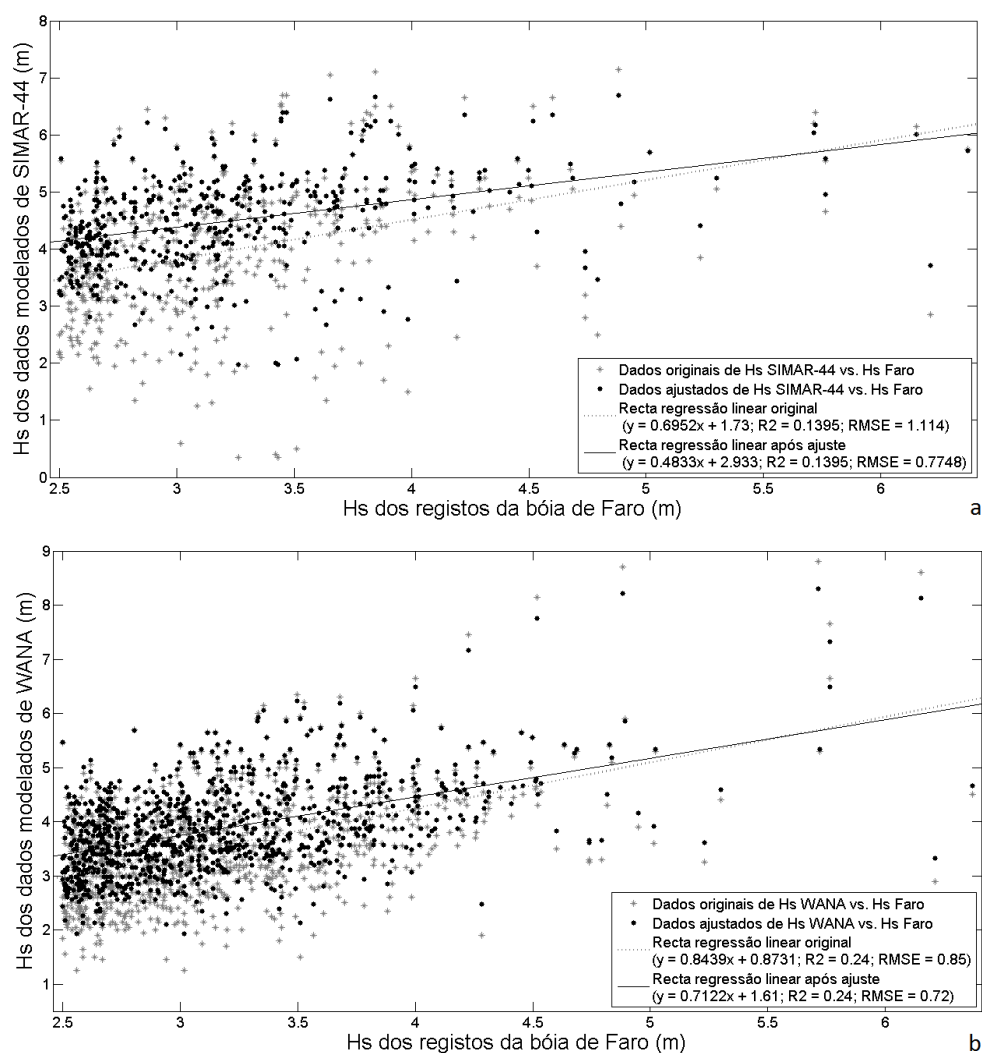


Figura 3.6 Correlação da altura significativa das ondas entre os dados modelados de SIMAR-44 e os registos da boia de Faro (a) e entre os dados modelados de WANA e os registos da boia de Faro (b) antes e após ajuste, para os casos de Sudoeste e em que a altura significativa da boia de Faro é igual ou superior a 2,5 m.

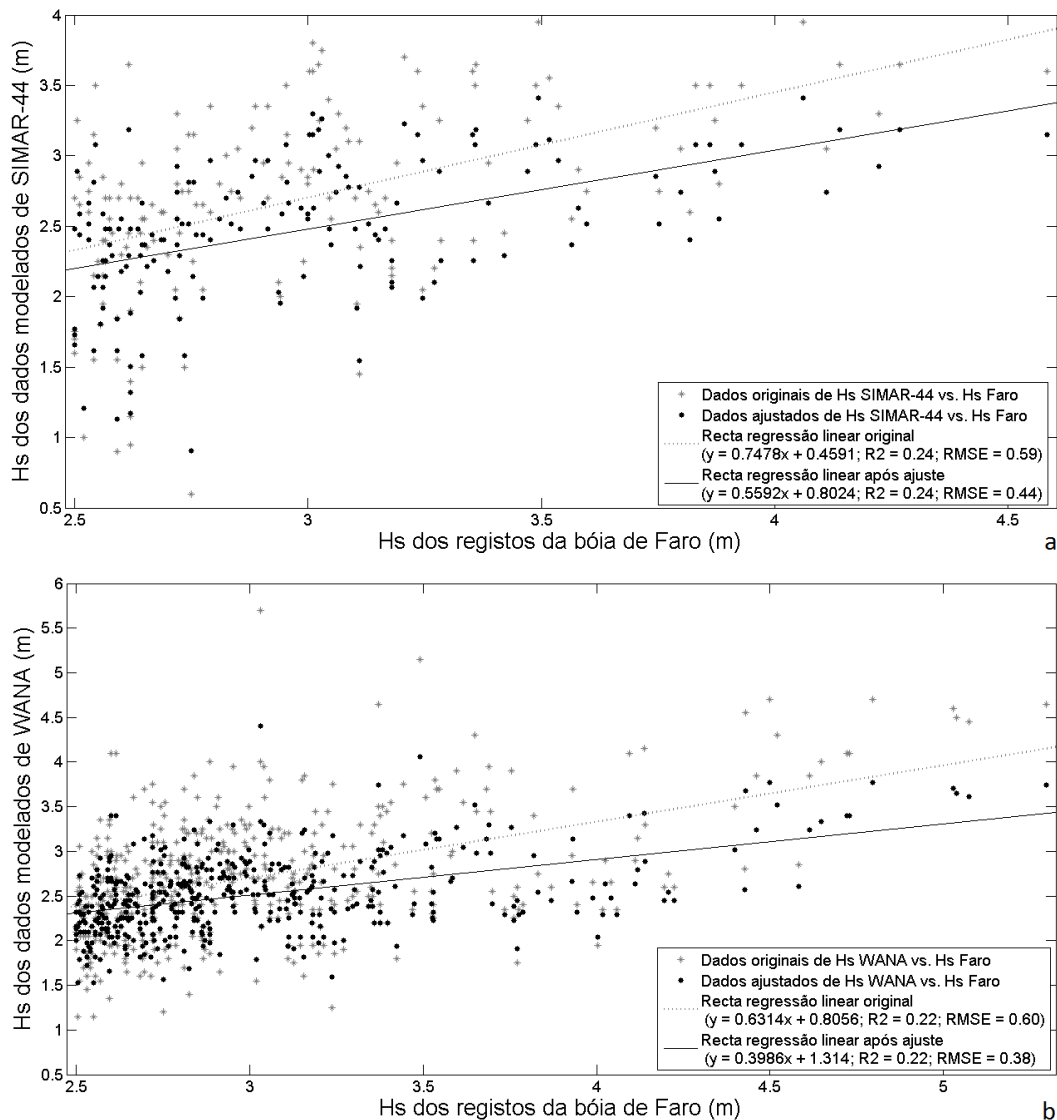


Figura 3.7 Correlação da altura significativa das ondas entre os dados modelados de SIMAR-44 e os registos da boia de Faro (a) e entre os dados modelados de WANA e os registos da boia de Faro (b) antes e após ajuste, para os casos de Sudeste e em que a altura significativa da boia de Faro é igual ou superior a 2,5m.

Para preencher as lacunas da boia de Faro foram determinados os valores de altura significativa das ondas dos registos da boia de Faro (ordenada em x) a partir das equações de regressão linear após ajuste (Figuras 3.6 e 3.7), através da substituição da ordenada em y pelos valores de altura significativa dos dados modelados de SIMAR-44 e WANA que correspondem aos respetivos períodos de ocorrência das lacunas.

Após este procedimento foram ainda encontradas 27 lacunas com 3 horas ou até 52 horas de duração (Tabela 3.2). Os casos com duração entre 3 a 9 horas foram preenchidos com o valor

da média entre os valores imediatamente anteriores e posteriores. As lacunas com duração superior ou igual a 12 horas foram preenchidas diretamente com os dados fornecidos da boia do Golfo de Cádiz.

Tabela 3.2 Datas de início e duração de cada lacuna encontrada na base de dados de Faro, após correções e preenchimento da mesma com os dados modelados SIMAR-44 e WANA.

Data inicial	Duração (h)	Data inicial	Duração (h)	Data inicial	Duração (h)
31/12/98 16:30	6	29/6/03 16:30	3	15/8/04 4:30	27
5/7/01 4:30	9	26/7/03 4:30	3	5/12/05 19:30	15
9/7/01 4:30	52	15/2/04 1:30	39	18/12/06 4:30	9
15/7/01 1:30	3	17/2/04 16:30	3	21/12/06 4:30	9
16/7/01 16:30	6	18/2/04 1:30	12	28/7/07 1:30	36
26/7/01 19:30	3	20/2/04 7:30	3	9/12/08 4:30	3
8/9/02 4:30	3	21/2/04 7:30	3	11/1/10 7:30	6
24/11/02 10:30	3	23/4/04 16:30	15	9/2/10 4:30	9
22/2/03 16:30	21	28/6/04 16:30	9	25/3/10 4:30	9

Relativamente, às correlações dos parâmetros de período de pico ( $T_p$ , s) e de direção das ondas (Dir, °) entre os dados de modelação numérica dos pontos SIMAR-44 e WANA e os respetivos registos da boia de Faro, para todos os casos, foi observado bastante dispersão e divergência entre os dados modelados e os registados. Dado isto, não foi possível estabelecer de forma direta uma função de transferência para se realizar um ajuste aos dados modelados relativamente aos registados. Assim, os dados modelados foram usados diretamente para preencher as lacunas dos registos da boia de Faro. Em anexo são apresentadas as análises destes resultados em detalhe (ANEXO 3.II).

Após o preenchimento de todas as lacunas, os dados das seis matrizes individualizadas inicialmente (SIMAR\_FaroInf2,5, WANA\_FaroInf2,5, SIMAR\_FaroSup2,5\_O-SO, SIMAR\_FaroSup2,5\_E-SE, WANA\_FaroSup2,5\_O-SO e WANA\_FaroSup2,5\_E-SE) foram compilados e foi construída a base de dados contínua de agitação marítima para Faro, com respetivas datas de ocorrências, para o período da série temporal em estudo, ou seja, desde as 13h30 do dia 10 de Fevereiro de 1993 às 19h30 do dia 31 de Março de 2012 (Figura 3.8).

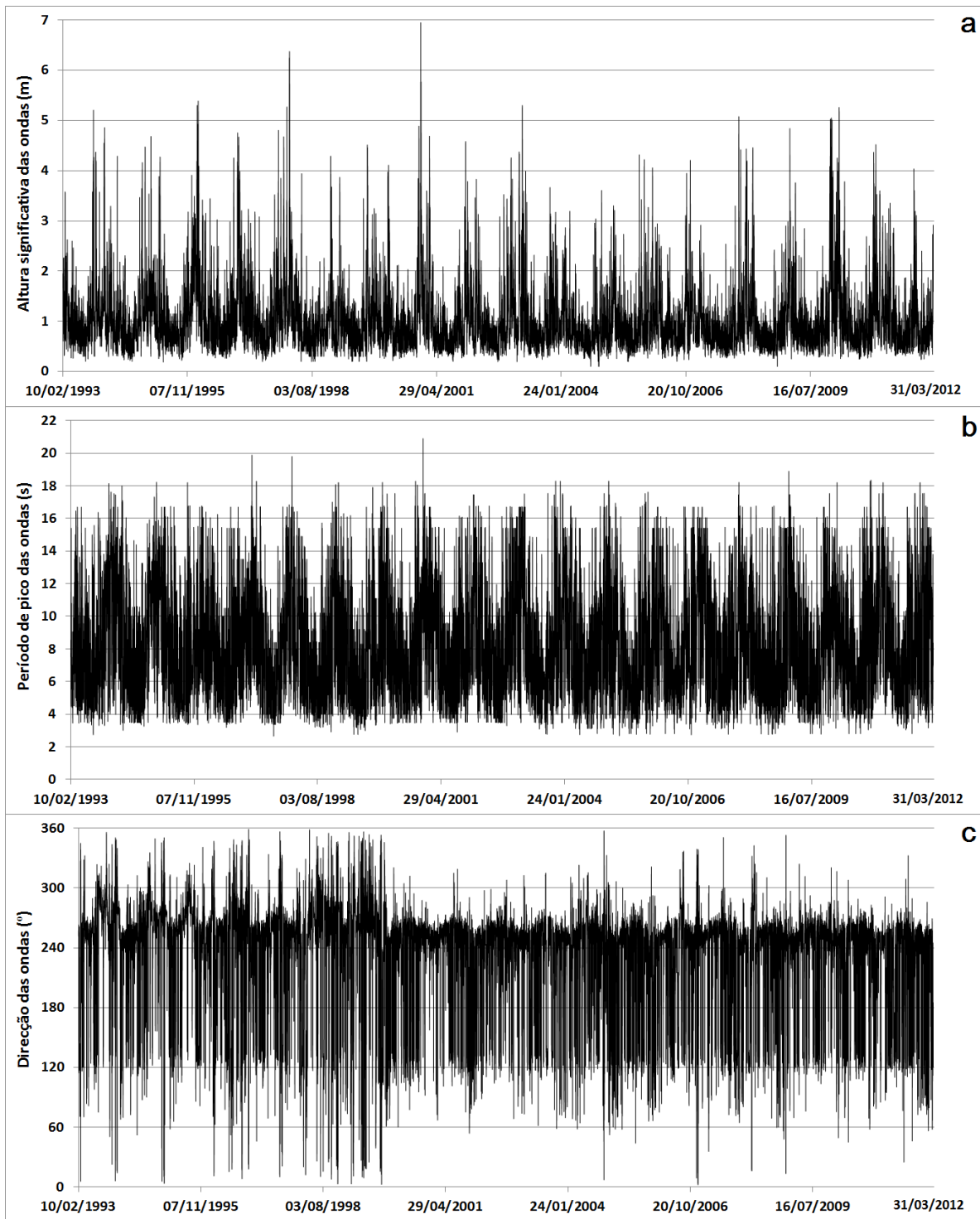


Figura 3.8 Base de dados de agitação marítima (a – altura significativa das ondas (m); b – período de pico (s); e c – direção das ondas (°)) desde 10 de fevereiro de 1993 a 31 de março de 2012.

No desenvolvimento do presente trabalho a utilização desta base de dados de agitação marítima foi essencial para a determinação de níveis de run-up (R2) para condições de E-SE e O-SO para diferentes classes de pendor de praia, como será descrito no capítulo 4.

### **3.3 Dados de Nível do Mar**

#### **3.3.1 Aquisição de dados**

Para a criação da base de dados de nível do mar foram utilizados os dados da rede REDMAR, nomeadamente dos marégrafos de Huelva (Lat 37.13°N Lon 6.83°W) e de Bonanza (Lat 36.80°N Lon 6.34°W) (Figura 3.1) a cerca de 90 e 140 km Este da zona de estudo, respetivamente. Estes dados foram concedidos pela entidade pública espanhola *Puertos del Estado* (<http://www.puertos.es/>) mediante requisição prévia justificada pela sua necessidade para a realização do presente trabalho.

O conjunto de dados REDMAR é formado por registos provenientes de uma rede de mais de 30 marégrafos dos *Puertos del Estado*, em funcionamento desde 1992. Inicialmente esta rede era constituída por marégrafos acústicos e de pressão SONAR. Estes proporcionavam dados brutos a cada 5 minutos que eram enviados para uma estação recetora localizada na Autoridade Portuária, que posteriormente eram encaminhados via correio eletrónico aos *Puertos del Estado* e submetidos automaticamente a um controlo de qualidade. A partir de 2006, a rede foi substituída por sensores radar MIROS. De uma forma geral, os dados adquiridos por estes sensores têm uma frequência de aquisição de 0.5 segundos. A informação também é transmitida para uma estação recetora localizada na Autoridade Portuária, onde são calculadas médias dos valores de nível do mar a cada minuto. Toda esta informação é transmitida via internet para os *Puertos del Estado*, onde os dados são submetidos automaticamente a um controlo de qualidade, de hora a hora, e armazenados no Banco de Dados Oceanográfico (Puertos del Estado, 2012b).

O conjunto de dados de cada marégrafo é composto por dois subconjuntos, diferenciados de acordo com o tipo de chegada de informação e pelo tipo de tratamento e controlo de qualidade. Estes subconjuntos são os i) dados horários filtrados e os ii) dados recebidos em tempo real, a cada 5 minutos. O subconjunto i) contém dados de Nível do mar (NivM, cm),

Componente de maré astronómica (Mar, cm) e Componente de resíduo meteorológico (Res, cm) de hora a hora, que foram obtidos através da aplicação de um filtro digital centrado no subconjunto ii). A aplicação deste filtro remove qualquer componente de energia com período inferior a 1 hora. Os dados do subconjunto i) passaram por um controlo de qualidade exaustivo para eliminação de valores anómalos, assim como, um controlo de estabilidade de diferenças horárias. O controlo de qualidade realizado aos dados do subconjunto ii) passou pela eliminação de valores fora de alcance, picos e estabilizações anómalas. Neste subconjunto não foram incluídas correções de diferenças horárias (Puertos del Estado, 2012b).

### 3.3.2 Construção da base de dados de nível do mar

Neste trabalho foram escolhidas as estações com código 3326, 3328 e 3329 de Huelva e a estação com código 3332 de Bonanza de forma a produzir por completo a série temporal em foco. Para análise neste trabalho foram utilizados os dados horários filtrados (subconjunto i)) de cada uma destas estações maregráficas.

Com o apoio do *software* MATLAB r2007b® foi desenvolvido um *script* com comandos para efetuar as correções necessárias e a compilação dos dados das diversas estações de forma a obter a base de dados final de nível do mar. Os comandos criados neste *script* serão descritos em pormenor nos parágrafos seguintes.

Inicialmente foram introduzidos como *input* no script desenvolvido, os dados de nível do mar provenientes da rede de marégrafos REDMAR. Estes dados foram individualizados em quatro matrizes (H3326, H3328, H3329 e B3332), uma para cada uma das estações utilizadas. Cada uma destas matrizes contém dados regulares de hora a hora de nível do mar (cm) e respetivas datas de ocorrência (ano, mês, dia, hora, minutos segundos). De seguida, os valores de nível do mar foram convertidos para metros e relativamente ao Nível Médio do Mar. Os dados de nível de mar resultantes deste processo foram processados através de uma estrutura de repetição de forma a obter os mesmos com uma frequência de 3 em 3 horas. Por último, os dados das quatro matrizes resultantes foram compilados numa só matriz final contendo dados de nível do mar e respetivas datas de ocorrências para o período da série temporal em estudo, ou seja, desde as 13h30 do dia 10 de fevereiro de 1993 às 19h30 do dia 31 de março

de 2012 (Figura 3.9). A maior percentagem de dados utilizados corresponde à estação de Huelva H3326, com 64 %, seguido das estações de Huelva H3329 e H3328 com, respetivamente, 17 e 12 % e por último da estação de Bonanza B3332 com 7 %.

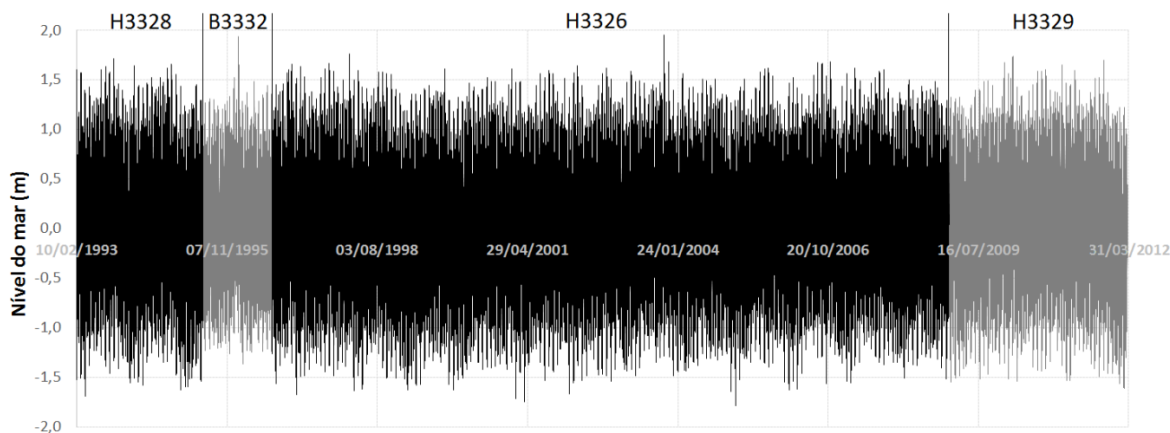


Figura 3.9 Base de dados de nível do mar (m) desde 10 de fevereiro de 1993 a 31 de março de 2012. Estações de Huelva: 10.02.1993 13h30 a 31.05.1995 19h30 – H3328; 01.09.1996 01h30 a 31.12.2008 19h30 – H3326; e 31.12.2008 22h30 a 31.03.2012 19h30 – H3329. Estação de Bonanza: 31.05.1995 22h30 a 31.08.1996 22h30 – B3332.

Esta base de dados de nível do mar foi determinante para o desenvolvimento do presente trabalho, nomeadamente nos cálculos de níveis de *run-up* máximos ( $R_{high}$ ) e consequente determinação de níveis de  $R_{high}$  associados a períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos para condições de E-SE e O-SO para diferentes classes de pendor de praia, como descrito no capítulo 4.

### 3.4 Individualização de Eventos de Tempestades

De acordo com, a definição de eventos de tempestade proposta por Houmb e Vik (1977), uma tempestade é definida como o período de tempo durante o qual a altura significativa das ondas ( $H_s$ ) excede um *threshold*. Uma das técnicas mais comuns utilizadas para definir eventos de tempestades individuais a partir de base de dados de ondas contínua é o método *peak-over-threshold* (POT) (Mendez, *et al.*, 2006). Assim, com base na abordagem de análise POT (*Peak Over Threshold*) foram extraídos os eventos de tempestade da base de dados de agitação de 19 anos. Como referido e justificado anteriormente no presente trabalho (*cf.* subcapítulo 2.2.3) o *threshold* assumido na análise POT foi de  $H_s \geq 2,5$  m ( $\alpha$ , Figura 3.10). O período de tempo mínimo durante o qual a  $H_s$  tem que ocorrer acima do *threshold* para se

considerar uma tempestade foi de 6 horas. Para a individualização de eventos de tempestades foi adotado um critério de independência, definido pelo período de tempo entre dois eventos de tempestade independentes consecutivos (Twan, 1988; Morton *et al.*, 1997; Dorsch *et al.*, 2008; Rangel-Buitrago e Anfuso, 2011; Almeida *et al.*, 2011a). Neste trabalho, o critério de independência foi definido para 72 horas (Ferreira *et al.*, 2016b).

Observando o gráfico da figura 3.10 com a variação da altura significativa das ondas (Hs, m) da boia ondógrafo de Faro durante o mês de dezembro de 1995 (dados extraídos da base de dados utilizada neste trabalho) é possível observar que para este mês foram registados três eventos de tempestade (A, B e C). No caso específico B, apesar de se verificarem 3 tempestades individuais o período de tempo entre si foi inferior a 72 horas logo foi considerado apenas um evento de tempestade. A tempestade C já não foi incluída em B pois o período de tempo entre cada um destes eventos ( $w$ ) foi de 74 horas. A duração de cada um dos eventos de tempestade A, B e C correspondem respetivamente a  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

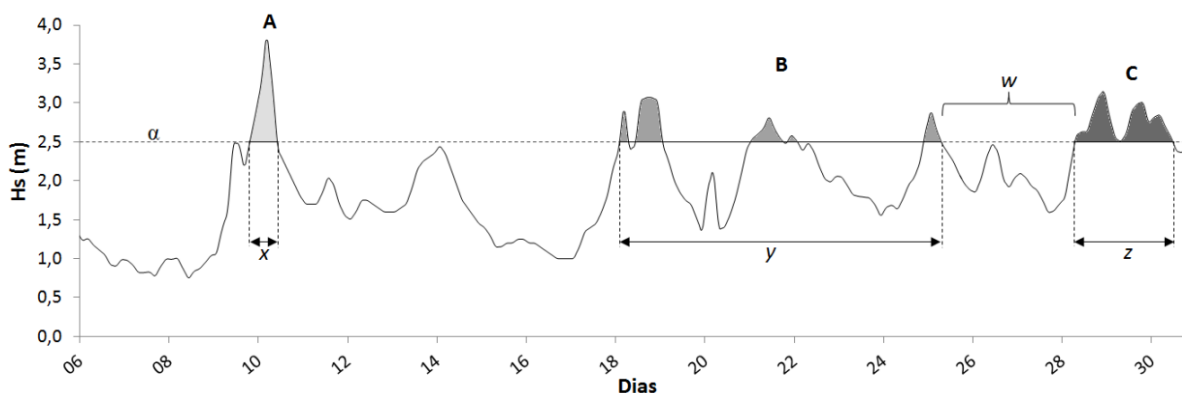


Figura 3.10 Variação da altura significativa das ondas (m) da boia ondógrafo de Faro durante o mês de dezembro de 1995, retirado da base de dados deste trabalho. Onde  $\alpha$  (*threshold*) é o valor de Hs acima do qual se considera tempestade; A, B e C são eventos de tempestades;  $x$ ,  $y$  e  $z$  correspondem à duração das tempestades A, B e C, respetivamente; e  $w$  é o período de tempo entre as tempestades B e C.

Para a individualização de eventos de tempestade foram utilizadas as matrizes de dados de agitação marítima e de nível do mar resultantes dos pontos 3.2. e 3.3. anteriores. Estas matrizes foram compiladas numa única matriz com datas (ano, mês, dia, horas, minutos e segundos), dados de agitação marítima (altura significativa – Hs, m; período de pico – Tp, s; direção das ondas – Dir, °) e dados de nível do mar (NivM, m), ao longo da série temporal em estudo. Esta matriz foi interpolada de forma a obter os respetivos dados com intervalos regulares de hora a hora.

Após a individualização de eventos de tempestades, de acordo com os critérios mencionados anteriormente, estes foram separados por eventos de tempestades de sudoeste (181-342°) e de sudeste (69-180°). No total, foram obtidos 129 e 70 eventos de tempestade de sudoeste e sudeste, respetivamente.

Para cada evento foi encontrado o valor de nível do mar máximo (NivM\_max, m) e, para o mesmo exato momento de ocorrência, os respetivos valores de altura significativa (Hs, m), período de pico (Tp, s) e direção das ondas (Dir, °). É de salientar que, após testes, se optou que seria mais representativo utilizar o valor de nível do mar máximo e respetivos valores de Hs, Tp e Dir para cada evento de tempestade, ao invés do valor de Hs máximo e respetivos valores de Tp, Dir e nível do mar, uma vez que o método utilizado para determinação de níveis de atuação (*Run-up*, descrito em pormenor no capítulo 4) máximos tem como base um modelo que foi definido para furacões, daí a importância/evidência da variação do nível do mar em contrapartida à variação da altura significativa das ondas. Por outro lado, o maior valor de Hs poderia ocorrer em maré baixa, daí resultando uma subestimativa dos resultados finais de erosão ou galgamento. Assim, optou-se sempre por determinar as potenciais consequências durante o nível do mar mais alto e às condições de agitação a ele associadas.

Com base nos valores de direção de onda (Dir, °) de cada evento de tempestade e na orientação da linha de costa de cada área (península do Ancão, e ilhas da Barreta, Culatra e Armona) foram determinados os respetivos ângulos de incidência (AngIncid, °) de cada evento de tempestade para cada área.

Para posteriormente ser efetuada a análise probabilística conjunta destes valores, foram criadas duas matrizes, um com dados para as tempestades de sudoeste (Temp\_SO) e outra para as de sudeste (Temp\_SE). Cada uma destas matrizes contém as datas do início de cada evento de tempestade (ano, mês, dia, horas, minutos e segundos), a duração de cada evento (Dur, h), o nível do mar máximo registado em cada evento (NivM\_max, m) e respetivos valores de altura significativa (Hs, m) e período de pico (Tp, s), e os ângulos de incidência (AngIncid, °) de cada evento consoante cada área. A matriz Temp\_SO contém os dados de eventos de tempestade que serão utilizados para os cálculos probabilísticos a aplicar para as áreas do flanco ocidental (Península do Ancão e Ilha da Barreta) e a matriz Temp\_SE para

as áreas do flanco oriental (Ilhas da Culatra e Armona). Em anexo são apresentadas tabelas com os dados destas matrizes (ANEXO 3.III).

No desenvolvimento do presente trabalho estas bases de dados relativos aos eventos de tempestades de sudoeste e de sudeste foram determinantes para os cálculos de recuo máximo ( $R_{max}$ ) que serão abordados no capítulo 5.

### 3.5 Parâmetros Morfodinâmicos

De forma a caracterizar e definir os parâmetros morfológicos coerentemente ao longo da zona de estudo foram assumidos os mesmos critérios para todas as áreas em estudo (Península do Ancão e Ilhas da Barreta, Culatra e Armona). Todos estes parâmetros foram extraídos com base em Modelos Digitais de Terreno (MDT) de alta resolução dos levantamentos LiDAR (“*Light Detection And Ranging*”) de 2009 e 2011, através de ferramentas disponíveis em Sistemas de Informação Geográfica (ArcGIS 10 ®). Todos os dados foram guardados em formato de arquivo informático (*shapefiles*) com informação geográfica, nomeadamente com valores das coordenadas geográficas e de elevação (referenciados relativamente ao sistema de coordenadas geográfico ETRS89 – *European Terrestrial Reference System* 1989).

Com base no esquema ilustrativo de um perfil de praia típico (Figura 3.11) os parâmetros morfológicos utilizados no presente estudo serão descritos nos parágrafos seguintes.

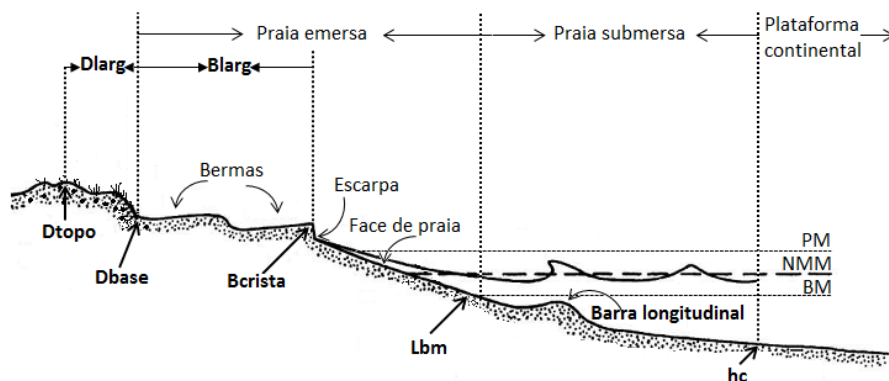


Figura 3.11 Esquema de perfil de praia típico com descrição de terminologias importantes utilizadas no presente trabalho (adaptado de Komar, 1976; Sorensen, 2006). Dtopo: crista da duna; Dlarg: largura da duna; Dbase: base da duna; Blarg: largura da berma; Bcrista: crista da berma; Lbm: elevação da linha de baixa-mar; hc: profundidade de fecho; PM: preia-mar; NMM: nível médio do mar; BM: baixa-mar.

Na zona superior do perfil, a crista da duna ( $D_{topo}$ , Figuras 3.11 e 3.12), foi assumida como a elevação máxima observada na duna, e a base da duna ( $D_{base}$ , Figuras 3.11 e 3.12), definida como o limite de transição entre a zona de pendor íngreme característico da face de duna e a zona de pendor suave característico da berma de praia. Nas áreas em que se observou mais do que uma formação dunar, foram assumidos os níveis da duna mais recente para a extração dos parâmetros  $D_{topo}$  e  $D_{base}$ . Nas áreas com estruturas artificiais ou onde não existia formação dunar assumiu-se o mesmo valor para  $D_{topo}$  e  $D_{base}$ . Nas áreas com estruturas artificiais, este valor foi assumido como a elevação imediatamente anterior às respetivas estruturas (Figura 3.12) e, nas áreas sem cordão dunar, foi considerado o valor da cota mais elevada existente nestas áreas.

Na zona da praia emersa, na extremidade do lado do mar da berma de praia, localiza-se o nível da crista da berma ( $B_{crista}$ , Figuras 3.11 e 3.12). É importante referir que, ao longo da zona de estudo e em especial nas zonas onde se verificou a formação de lobos de praia, a definição da  $B_{crista}$  consistiu no limite de transição entre a zona com maior espaçamento entre curvas de nível, i.e., zona de pendor mais suave característico da extremidade do lado do mar da berma de praia, e a zona com menor espaçamento entre curvas de nível, i.e., zona íngreme característica de escarpa ou início da face de praia. Ainda na zona da praia emersa, também foi definida a linha de baixa-mar ( $L_{bm}$ , Figuras 3.11 e 3.12) como o valor da cota intermédia entre a linha de água que marca o refluxo da onda durante a maré-baixa e a espuma da rebentação. Em alguns locais da zona de estudo, nomeadamente nas Ilhas da Culatra e Armona, era visível o terraço de maré, conseqüentemente, o limite inferior utilizado na definição da  $L_{bm}$  passou a ser o limite das acumulações de água que existiam no terraço de maré ao invés da espuma de rebentação. Assim, foram criados quatro *shapefiles* de linhas longitudinais para representação dos parâmetros morfológicos  $D_{topo}$ ,  $D_{base}$ ,  $B_{crista}$  e  $L_{bm}$  ao longo da zona de estudo (Figura 3.12).

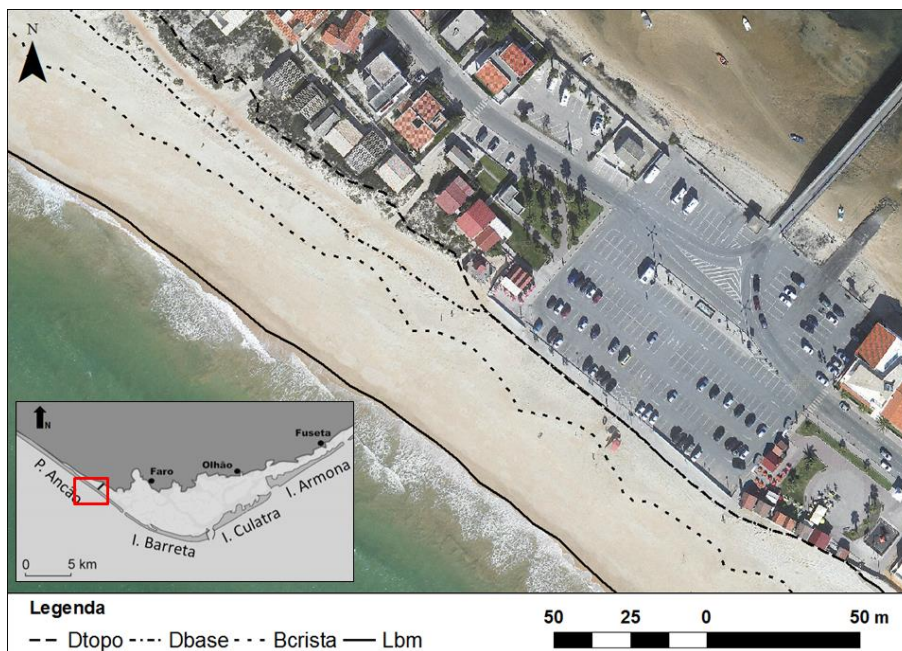


Figura 3.12 Fotografia aérea de uma pequena área da Península do Ancão (zona central da praia de Faro) com representação de *shapefiles* de linhas longitudinais criadas para extração da elevação da linha de baixa-mar (Lbm), crista da berma (Bcrista), base da duna (Dbase) e topo da duna (Dtopo). Imagem de fundo adaptada das fotografias aéreas do LiDAR 2009.

Estes *shapefiles* de linhas foram transformados em *shapefiles* de pontos com espaçamento de 10 m entre si (Figura 3.13) a partir dos quais foram extraídos os valores de elevação de cada parâmetro a cada 10 m em toda a zona de estudo. Estes resultados foram utilizados juntamente com os dos parâmetros forçadores de tempestades na determinação de níveis de *run-up* extremos (Rhigh, capítulo 4), dos regimes de colisão e galgamento (capítulo 4), e no cálculo dos valores de recuo máximos (Rmax, capítulo 5).

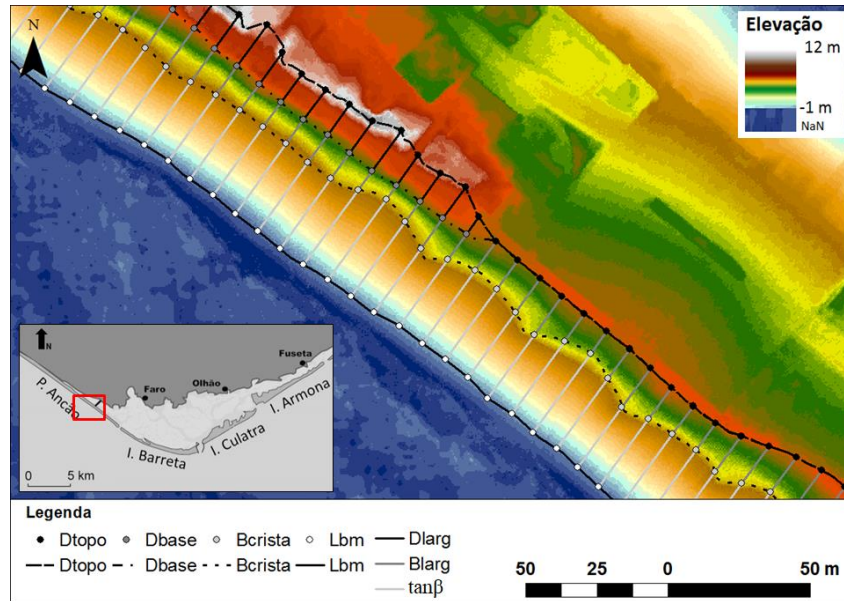


Figura 3.13 Modelo Digital de Terreno (MDT) de uma pequena área da Península do Ancão (zona central da praia de Faro) com representação dos *shapefiles* de linhas longitudinais da Lbm, Bcrista, Dbase e Dtopo, dos *shapefiles* de pontos com espaçamento de 10 m entre si dos mesmos parâmetros morfológicos, e dos *shapefiles* de linhas transversais do pendore da face de praia ( $\tan \beta$ ) e das larguras da berma e duna (Blarg e Dlarg, respetivamente). Imagem de fundo adaptada dos MDTs do LiDAR 2009.

Com base nos *shapefiles* de pontos dos parâmetros morfológicos Dtopo e Dbase foram criados *shapefiles* de linhas transversais através da união de cada um dos pontos do topo da duna ao respetivo ponto da base da duna, representando assim a largura da duna (Dlarg, Figuras 3.11 e 3.13). Para a representação da largura da berma (Blarg, Figuras 3.11 e 3.13) foi realizado o mesmo procedimento, mas com base nos *shapefiles* de pontos dos parâmetros morfológicos Bcrista e Lbm. Foram determinados os respetivos comprimentos destes *shapefiles* de linhas transversais (Dlarg e Blarg, Figura 3.13) que representam os valores das larguras de duna e de berma a cada 10 m ao longo da zona de estudo. Estes resultados foram incorporados na determinação dos regimes de colisão e galgamento (capítulo 4).

Para a extração dos valores de pendore de face de praia ( $\tan \beta$ , Figura 3.13) foi utilizada a ferramenta MAPBeach, também em ambiente SIG, desenvolvida por Horta *et al.* (2013). Esta ferramenta foi criada com o intuito de simplificar a análise morfológica em sistemas de praias. Para extração dos valores de  $\tan \beta$  foi utilizada a secção desta ferramenta que permite obter a caracterização da face de praia nas áreas em estudo. Para o qual foi necessário utilizar como dados de entrada: os MDTs da zona de estudo e os *shapefiles* de pontos dos parâmetros

morfológicos Bcrista e Lbm de cada perfil. Assim, foram obtidos os valores de pendor de face de praia a cada 10 m ao longo da zona de estudo. Com base nos resultados de  $\tan \beta$  foi possível determinar níveis máximos de atuação de espraio ( $R_{high}$ , capítulo 4) para períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos, consoante diferentes classes de pendor de praia. E desta forma distinguir secções ao longo da zona de estudo de acordo com a sua vulnerabilidade a colisão e galgamento (capítulo 4). Os valores de  $\tan \beta$  foram ainda utilizados nos cálculos de recuo máximo ( $R_{max}$ , capítulo 5).

Na zona de transição entre a praia submersa e a plataforma continental, localiza-se a profundidade de fecho ( $h_c$ , Figuras 3.11 e 3.14) que representa o limite, no sentido do mar, até ao qual existe variação morfológica significativa do perfil de praia, como consequência da atividade das ondas junto ao fundo (Silva *et al.*, 2008). A extração de  $h_c$  e da distância desde a curva de nível zero ( $Z = 0$  NMM) até  $h_c$  (Perfis, Figura 3.14) foi a única que teve como base os MDTs do LiDAR de 2011, visto que os MDTs do LiDAR de 2009 não contêm informação batimétrica.

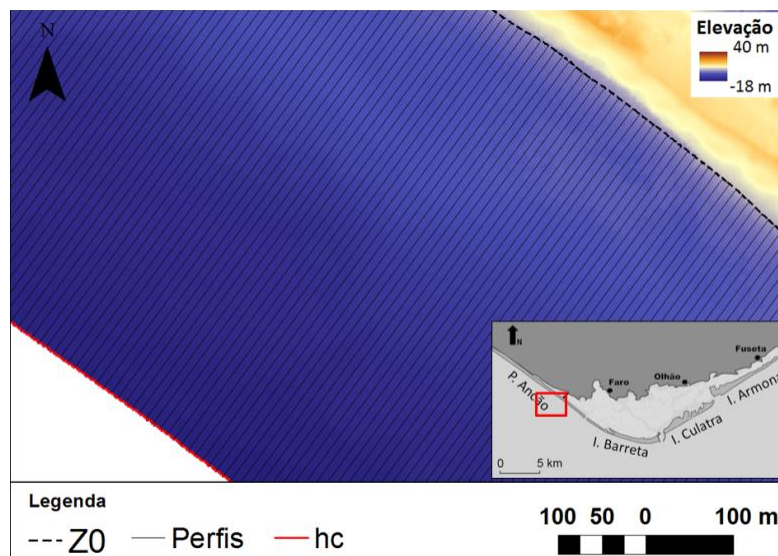


Figura 3.14 Modelo Digital de Terreno (MDT) de uma pequena área da Península do Ancão (zona central da praia de Faro) com representação da curva de nível dos 0 m NMM ( $Z_0$ ), *shapefile* de linha longitudinal da profundidade de fecho ( $h_c$ ), e *shapefile* de linhas transversais desde  $Z_0$  a  $h_c$  com espaçamento de 10 m entre si (Perfis). Imagem de fundo adaptada dos MDTs do LiDAR 2011.

Os valores de Perfis foram obtidos a cada 10 m ao longo da zona de estudo. Os valores de  $h_c$  corresponderam ao valor de cota máximo extraído na extremidade final de cada segmento de

Perfis. A extração de hc e Perfis foi essencial para a determinação do diâmetro médio dos sedimentos (D50, capítulo 5) em cada perfil, e este foi, conseqüentemente, indispensável nos cálculos de recuo máximo (Rmax, capítulo 5).

Após a extração e/ou determinação dos parâmetros morfológicos, nomeadamente, Dtopo, Dbase, Dlarg, Blarg,  $\tan \beta$ , hc e Perfis, essenciais a utilizar nos procedimentos que se seguiram do presente trabalho, foram individualizadas secções de 100 metros ao longo de cada uma das áreas em estudo (Península do Ancão, Ilhas da Barreta, Culatra e Armona). A cada uma destas secções foi atribuído o valor médio destes parâmetros, correspondente à média dos 10 valores de cada parâmetro contidos dentro da respetiva secção (Figura 3.15).

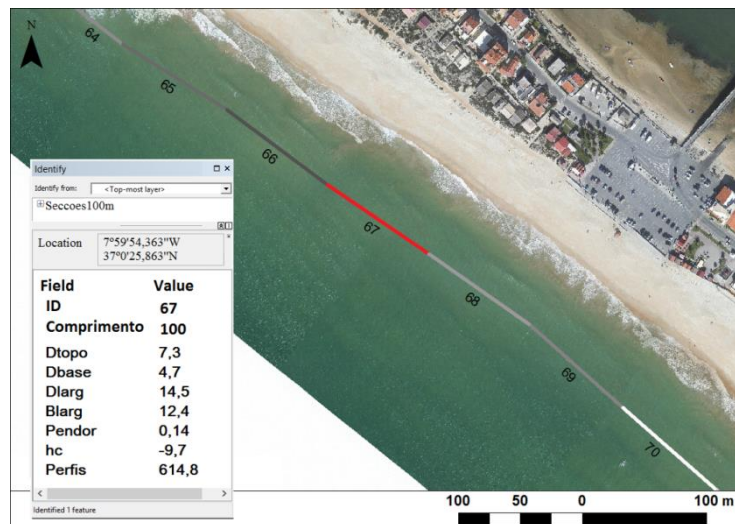


Figura 3.15 Fotografia aérea de uma pequena área da Península do Ancão (zona central da praia de Faro) com representação de *shapefile* de linha longitudinal das secções de 100 m. Caixa de Informação com dados dos parâmetros para a área 67. Imagem de fundo adaptada das fotografias aéreas do LiDAR 2009.

Foram ainda determinados os valores médios, máximos de mínimos dos parâmetros morfológicos (Dtopo, Dbase, Dlarg, Blarg,  $\tan \beta$ , hc e Perfis) para cada área em estudo, assim como, para cada uma das zonas individualizadas dentro de cada área (Tabelas 3.3 a 3.6). Através da análise destes resultados foi possível complementar a caracterização morfológica da zona de estudo de forma quantitativa e mais detalhadamente ao longo das zonas diferenciadas dentro de cada área em estudo. Anteriormente à descrição desta análise é essencial referir que, tendo em conta a forte influência que os processos hidrodinâmicos que ocorrem nas barras de maré e zonas adjacentes (e.g. variações de formas de fundo dos deltas de vazante) têm na propagação das ondas nestes locais, foi importante assumir com

precaução os resultados aqui obtidos. Por conseguinte, no presente trabalho as secções adjacentes, tanto a montante como a jusante das barras de maré incluídas na zona de estudo (Barras do Ancão, Faro-Olhão, Armona e Fuseta; ver Figura 2.2.1 – Capítulo 2), não foram consideradas para análise. Nos parágrafos seguintes, que abrangem a descrição da análise dos parâmetros morfológicos, será referido e justificado em pormenor para cada área de estudo as secções que não foram incluídas para análise.

A área da Península do Ancão considerada para análise, desde a localização do restaurante Maria's (Praia do Garrão Poente) até ao extremo nascente da própria península (Figura 3.16), foi dividida em 109 secções de 100 m cada. No entanto, as últimas 8 secções foram descartadas da análise devido à influência que os bancos arenosos do delta de vazante da Barra do Ancão impõem à propagação das ondas nestas áreas. Assim, das 101 secções resultantes para a área da P. Ancão, à zona ocidental, central e oriental correspondem, respetivamente, as secções 1 a 56, 57 a 85 e 86 a 101 (Figura 3.16).

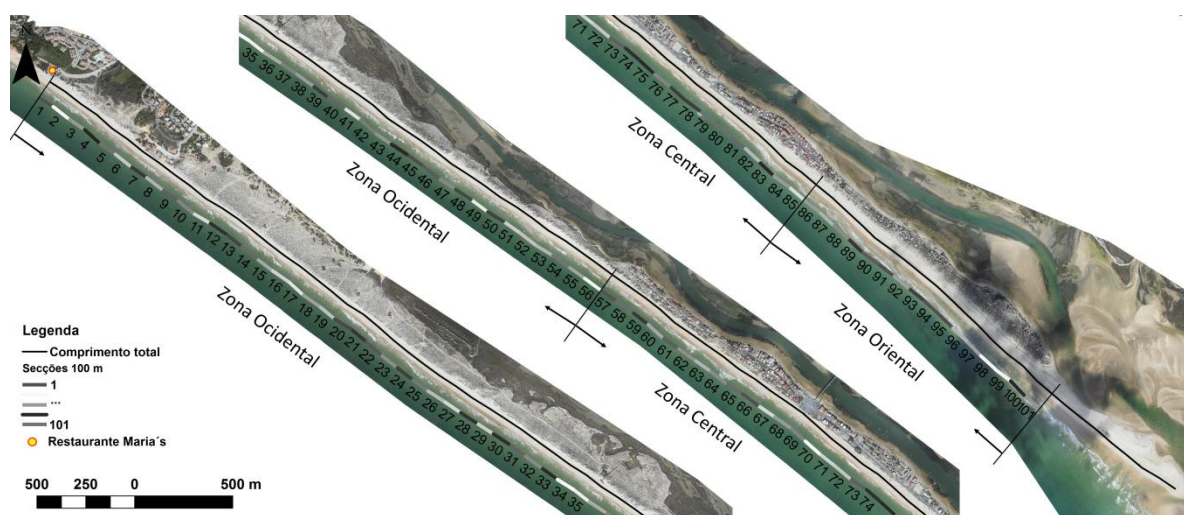


Figura 3.16 Fotografia aérea da Península do Ancão (LiDAR 2009) com representação de *shapefiles* do comprimento total e das secções de 100 m e com identificação das zonas ocidental, central e oriental.

A cota mais elevada (10 m acima do Nível Médio do Mar - NMM) observada em toda a zona de estudo foi registada na zona ocidental da Península do Ancão (Tabela 3.3). Progredindo do extremo poente para Este as elevações da crista dunar da P. Ancão vão diminuindo até à zona oriental, atingindo valores mínimos de 5 m acima do NMM nesta zona (Tabela 3.3). Interessante verificar que a amplitude de variação das elevações de base de duna é bastante semelhante em todas as zonas da P. Ancão, variando entre 4 e 6 m acima do NMM nas zonas

ocidental e oriental, e entre 5 e 6 m acima do NMM na zona central. Em média base de duna corresponde sempre a 5 m acima NMM ao longo da P. Ancão (Tabela 3.3). O desenvolvimento de larguras de berma e de face de duna foi notável na zona oriental, onde foram observados os valores máximos ( $D_{larg} = 64$  m e  $B_{larg} = 51$  m) de toda a P. Ancão (Tabela 3.3). Importante verificar que na zona central da P. Ancão foram registadas secções sem largura de face de duna (0 m; Tabela 3.3) e em média a largura de face de duna nesta zona são pouco desenvolvidas (média  $D_{larg} = 9$  m; Tabela 3.3). Em termos médios os pendores de face de praia foram bastante similares em todas as zonas da P. Ancão, nomeadamente, de 0.12 na zona ocidental e de 0.13 nas zonas central e oriental (Tabela 3.3). No entanto, foi na P. do Ancão que foram observados os pendores mais íngremes de toda a zona de estudo (0.17; Tabela 3.3). A profundidade de fecho na P. Ancão ronda entre os 9 e 10 m abaixo do NMM, a uma distância de aproximadamente 600 m desde a curva de nível de 0 m NMM (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 Valores máximos, mínimos e médios da largura da berma ( $B_{larg}$ ), largura da duna ( $D_{larg}$ ), base da duna ( $D_{base}$ ), topo da duna ( $D_{topo}$ ), pendor da face de praia ( $\tan \beta$ ), profundidade de fecho ( $hc$ ) e distância entre a cota 0 NMM até à  $hc$  (Perfis) na zona ocidental, central e oriental da Península do Ancão. As unidades de todos os parâmetros estão em metros à exceção de  $\tan \beta$  que não tem unidade pois corresponde à tangente de um ângulo.

		$B_{larg}$	$D_{larg}$	$D_{base}$	$D_{topo}$	$\tan \beta$	$hc$	Perfis
Zona Ocidental	Máximo	32	26	6	10	0,14	-9	619
	Mínimo	10	10	4	6	0,11	-10	586
	Média	17	16	5	8	0,12	-9	605
Zona Central	Máximo	44	23	6	8	0,17	-9	615
	Mínimo	10	0	5	5	0,12	-10	580
	Média	23	9	5	7	0,13	-10	603
Zona Oriental	Máximo	51	64	6	7	0,15	-9	588
	Mínimo	19	5	4	5	0,09	-10	541
	Média	33	35	5	7	0,13	-10	562

Ao longo da extensão total da Ilha da Barreta foram obtidas 79 secções de 100 m cada. Na extremidade a Oeste não foram consideradas para análise as primeiras 6 secções, uma vez que a propagação das ondas na área que compreende estas secções é influenciada pelos bancos arenosos do delta de vazante da barra do Ancão. Na extremidade a Este não foram consideradas as últimas 4 secções devido à influência do molhe da Barra de Faro-Olhão na

propagação das ondas. Assim, na I. Barreta foram analisadas 69 secções. A zona ocidental engloba as secções 1 a 25 e a zona oriental as secções 26 a 69 (Figura 3.17).

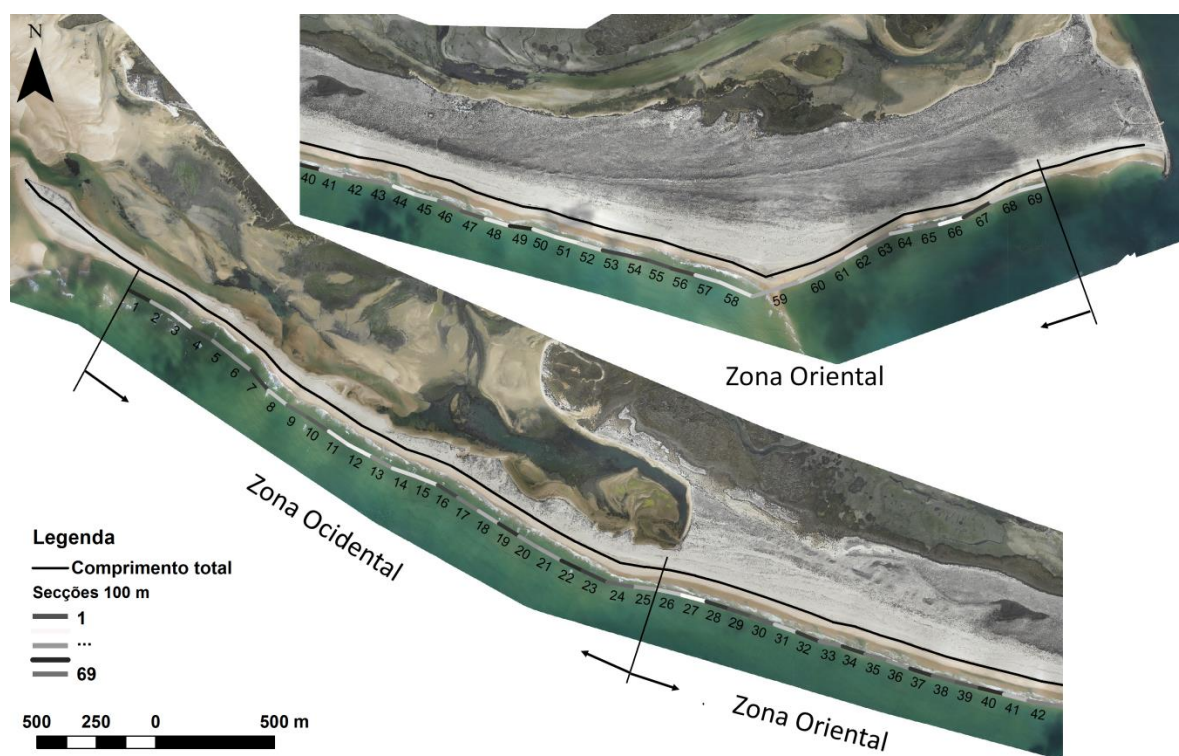


Figura 3.17 Fotografia aérea da Ilha da Barreta (LiDAR 2009) com representação de *shapefiles* do comprimento total e das secções de 100 m e com identificação das zonas ocidental e oriental.

Em praticamente toda a extensão da zona ocidental da Ilha da Barreta a base de duna coincide com o topo da duna correspondendo em média a elevações de 4 m acima do NMM (Tabela 3.4). Nesta zona o desenvolvimento da face de duna é praticamente inexistente (média  $D_{larg} = 1$  m; Tabela 3.4). A evolução morfológica observada na zona oriental é oposta à da zona ocidental. O cordão dunar frontal na zona oriental da I. Barreta encontra-se bem desenvolvido. A elevação máxima da crista dunar observada foi de 8 m acima do NMM e em média é de 5 m acima do NMM (Tabela 3.4). O desenvolvimento da berma de praia e da face de duna é bastante notável na zona oriental. Sendo observados valores máximos de larguras de berma e de face de duna de 124 e 92 m, respetivamente (Tabela 3.4). Em média, os pendores de face de praia na I. Barreta são mais acentuados na zona ocidental (0.14; Tabela 3.4) do que na zona oriental (0.12; Tabela 3.4). Em termos médios, a profundidade de fecho na zona ocidental é de 9 m abaixo do NMM a uma distância de 591 m desde a curva de nível

de 0 m NMM, e na zona oriental é de 8 m abaixo do NMM a uma distância de 543 m desde a curva de nível de 0 m NMM (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 Valores máximos, mínimos e médios da largura da berma (Blarg), largura da duna (Dlarg), base da duna (Dbase), topo da duna (Dtopo), pendor da face de praia ( $\tan \beta$ ), profundidade de fecho (hc) e distância entre a cota 0 NMM até à hc (Perfis) na zona ocidental e oriental da Ilha da Barreta. As unidades de todos os parâmetros estão em metros à exceção de  $\tan \beta$  que não tem unidade pois corresponde à tangente de um ângulo.

		Blarg	Dlarg	Dbase	Dtopo	$\tan \beta$	hc	Perfis
Zona Ocidental	Máximo	53	6	4	4	0,16	-8	680
	Mínimo	3	0	3	3	0,10	-10	524
	Média	13	1	4	4	0,14	-9	591
Zona Oriental	Máximo	124	92	5	8	0,14	-6	675
	Mínimo	8	1	3	4	0,10	-16	420
	Média	60	42	4	5	0,12	-8	543

Da divisão inicial em secções de 100 m efetuada à extensão total da Ilha da Culatra resultaram 68 secções. As primeiras 4 secções localizadas na extremidade poente não foram consideradas para análise pois para além de se encontrarem numa área artificializada por enrocamento, a propagação das ondas nesta área é fortemente influenciada pelo molhe da Barra de Faro-Olhão. Na extremidade nascente não foram analisadas as últimas 8 secções devido à influência do delta de vazante da Barra da Armona na propagação das ondas na área que engloba estas secções. Resultando assim um total de 56 secções de 100 m para análise. As secções 1 a 20 enquadram-se na zona ocidental e as secções 21 a 56 na zona oriental (Figura 3.18).

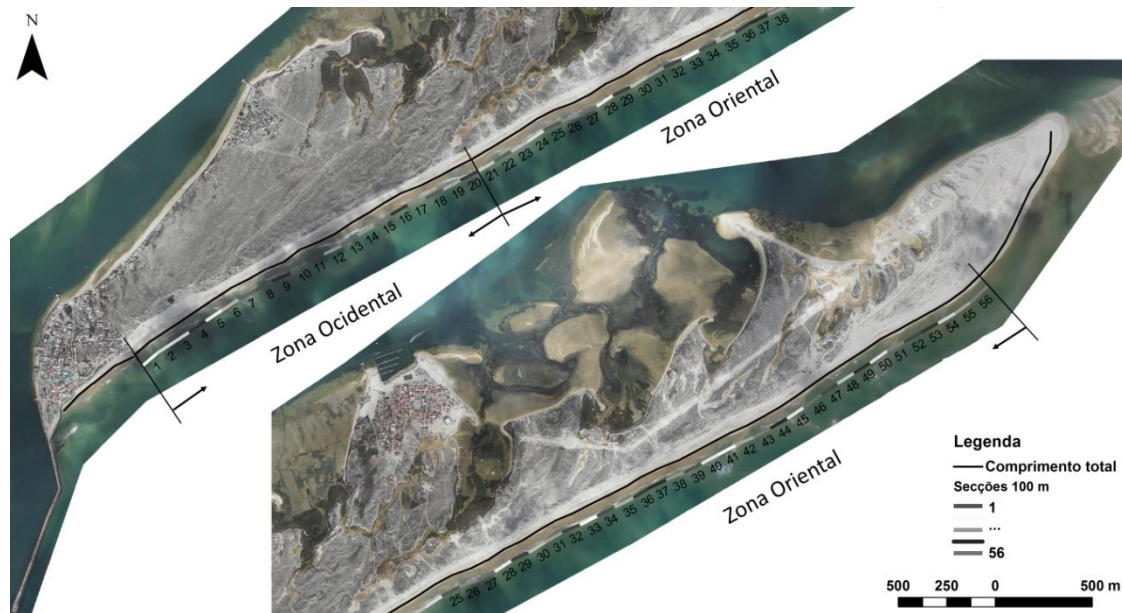


Figura 3.18 Fotografia aérea da Ilha da Culatra (LiDAR 2009) com representação de *shapefiles* do comprimento total e das secções de 100 m e com identificação das zonas ocidental e oriental.

A amplitude de variação da elevação da base da duna frontal mantém-se ao longo da Ilha da Culatra e em média assume 4 m de elevação acima NMM (Tabela 3.5). Por outro lado, mesmo sendo observado que a elevação média da crista dunar é de 5 m acima NMM (Tabela 3.5) em ambas as zonas ocidental e oriental, a amplitude de variação deste parâmetro é bastante diferente de uma zona para a outra, devido principalmente a um decréscimo acentuado da crista dunar observado no extremo nascente da zona oriental. Assim, enquanto o topo de duna na zona ocidental varia entre 5 e 6 m acima do NMM, na zona oriental varia entre 3 e 7 m acima do NMM (Tabela 3.5). A crista dunar com menor elevação em toda a zona de estudo (2,65 m acima NMM) foi observada na zona oriental da I. Culatra. Como mencionado anteriormente a divisão entre zona ocidental e oriental na I. da Culatra esteve relacionada com as variações observadas nas larguras de berma de praia e de face de duna. O desenvolvimento destas larguras na zona oriental é bastante evidenciado, chegando a ser observadas larguras de berma e de face de duna máximas de 106 e 92 m, respetivamente (Tabela 3.5). No entanto, na zona ocidental as larguras de berma são pouco desenvolvidas (média  $Blarg = 7$  m; Tabela 3.5) e as larguras de face de duna são praticamente inexistentes (média  $Dlarg = 0$  m; Tabela 3.5) A inclinação da face de praia em média é bastante semelhante em ambas as zonas, sendo superior na zona ocidental (0.14) relativamente à oriental (0.13) (Tabela 3.5). Em termos médios, a profundidade de fecho na zona ocidental é

de 9 m abaixo do NMM a uma distância de 603 m desde a curva de nível de 0 m NMM, e na zona oriental é de 8 m abaixo do NMM a uma distância de 524 m desde a curva de nível de 0 m NMM (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 Valores máximos, mínimos e médios da largura da berma (Blarg), largura da duna (Dlarg), base da duna (Dbase), topo da duna (Dtopo), pendor da face de praia ( $\tan \beta$ ), profundidade de fecho (hc) e distância entre a cota 0 NMM até à hc (Perfis) na zona ocidental e oriental da Ilha da Culatra. As unidades de todos os parâmetros estão em metros à exceção de  $\tan \beta$  que não tem unidade pois corresponde à tangente de um ângulo.

		Blarg	Dlarg	Dbase	Dtopo	$\tan \beta$	hc	Perfis
Zona Ocidental	Máximo	18	6	4	6	0,16	-8	680
	Mínimo	3	0	3	5	0,12	-10	569
	Média	7	0	4	5	0,14	-9	603
Zona Oriental	Máximo	106	92	4	7	0,14	-6	568
	Mínimo	18	0	3	3	0,10	-10	420
	Média	58	38	4	5	0,13	-8	524

A extensão costeira da Ilha da Armona em análise foi dividida em 83 secções de 100 m cada. Destas secções não foram consideradas para análise as primeiras 5 secções, na extremidade poente, e as últimas 5, na extremidade nascente. Estas secções não foram analisadas devido à influência dos deltas de vazante das Barras da Armona e Fuseta na propagação das ondas nas áreas correspondentes a essas secções. Assim, na I. Armona foram analisadas 73 secções de 100 m cada. Desde a 1ª à 43ª secção correspondem à zona ocidental e desde a 44ª à 73ª à zona oriental (Figura 3.19).

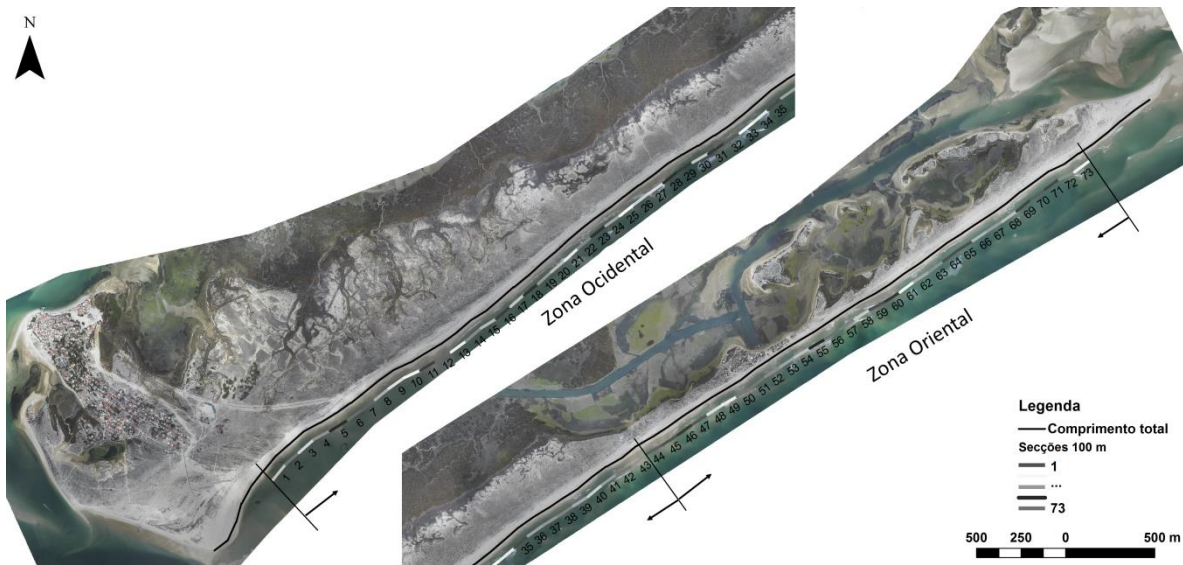


Figura 3.19 Fotografia aérea da Ilha da Armona (LiDAR 2009) com representação de *shapefiles* do comprimento total e das secções de 100 m e com identificação das zonas ocidental e oriental.

Em média, todos os parâmetros morfológicos apresentam valores bastante semelhantes em ambas as zonas ocidental e oriental da Ilha da Armona, à exceção da largura de face de duna. É notável a variação da largura de face de duna média da zona ocidental (21 m) para a zona oriental (8 m) (Tabela 3.6). É na zona ocidental que são observados os valores máximos de todos os parâmetros (Tabela 3.6). O pendor da face de praia médio é de 0,09 e 0,10 na zona ocidental e oriental, respetivamente (Tabela 3.6). Em termos médios, a profundidade de fecho na I. Armona corresponde a cerca de 7 m abaixo do NMM a aproximadamente 600 m de distância desde a curva de nível de 0 m NMM (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 Valores máximos, mínimos e médios da largura da berma (Blarg), largura da duna (Dlarg), base da duna (Dbase), topo da duna (Dtopo), pendor da face de praia ( $\tan\beta$ ), profundidade de fecho (hc) e distância entre a cota 0 NMM até à hc (Perfis) na zona ocidental e oriental da Ilha da Armona. As unidades de todos os parâmetros estão em metros à exceção de  $\tan\beta$  que não tem unidade pois corresponde à tangente de um ângulo.

		Blarg	Dlarg	Dbase	Dtopo	$\tan\beta$	hc	Perfis
Zona Ocidental	Máximo	43	37	4	7	0,13	-7	601
	Mínimo	10	5	3	3	0,06	-8	571
	Média	26	21	3	5	0,09	-7	593
Zona Oriental	Máximo	34	20	4	6	0,11	-7	647
	Mínimo	9	2	3	3	0,08	-8	549
	Média	23	8	3	4	0,10	-7	611

## 4. POTENCIAL DE COLISÃO E DE GALGAMENTO

### 4.1 Introdução

Uma grande percentagem da população a nível mundial está concentrada na zona costeira, incluindo a maioria das principais cidades. Mais concretamente, de acordo com diversos estudos cerca de 100 milhões de pessoas vivem a menos de um metro do Nível Médio do Mar (Zhang *et al.*, 2004). A zona costeira está sujeita a diversos perigos naturais dos quais tanto podem resultar graves prejuízos a nível económico como sérios danos ambientais e até mesmo perda de vidas humanas (Pérez-Maqueo *et al.*, 2007; Matias *et al.*, 2009). Um dos perigos naturais responsável pela vulnerabilidade costeira é o impacto de tempestades marítimas. Em sistemas de ilhas barreira, duas das principais consequências que advém da ocorrência de tempestades são a erosão de praias e dunas e o galgamento de barreiras naturais ou estruturas artificiais, das quais podem resultar a danificação de infraestruturas em zonas costeiras desenvolvidas e a destruição de habitats (Godschalk *et al.*, 1989). Assim, é fundamental perceber os mecanismos de resposta dos sistemas costeiros ao impacto de tempestades de forma a identificar as respetivas consequências associadas e elaborar mapas de vulnerabilidade costeira, que são essenciais na tomada de medidas de mitigação e/ou estratégias de adaptação nas zonas costeiras afetadas. Promovendo desta forma a gestão e planeamento costeiro responsáveis (Godschalk *et al.*, 1989; Ferreira, 2005; Stockdon *et al.*, 2007).

As tempestades marítimas são um dos principais fenómenos responsáveis pela erosão de sistemas de praias naturais (Birkemeier, 1979; Fenster *et al.*, 2001). Numa escala temporal de curto-prazo (horas a dias) pode assumir-se que as tempestades são o principal fator determinante na variação da linha de costa (Ferreira, 2006). Em alguns casos os eventos de tempestade dominam completamente a história de erosão da linha de costa (Birkemeier, 1979; Fenster *et al.*, 2001).

Com o aumento da intensidade das tempestades e conseqüente aumento da extensão de alcance das ondas, a erosão da praia pode estender-se até às dunas embrionárias ou mesmo

às dunas frontais (Kriebel e Dean, 1985). As dunas frontais que se desenvolvem na zona interna das praias servem diretamente como proteção a comunidades costeiras salvaguardando vidas, infraestruturas e ecossistemas da erosão, galgamento e inundação durante tempestades severas (e.g., Cooper, 1958; Komar *et al.*, 1999; Sallenger, 2000; Stockdon *et al.*, 2007, 2009; Seabloom *et al.*, 2013). Em zonas costeiras com áreas urbanizadas desenvolvidas ao longo e sobre o cordão dunar, as praias assumem a única proteção aos edifícios e infraestruturas, ao agirem como um “amortecedor” ao ataque das tempestades (Almeida *et al.*, 2012). Uma vez que tendencialmente as zonas costeiras são densamente ocupadas de forma desorganizada, o conhecimento aprofundado e a compreensão da resposta destes sistemas costeiros arenosos ao impacto de tempestades (e.g. erosão e galgamento) é essencial, dado à importância que estes sistemas apresentam como sistemas naturais de proteção costeira.

Sobre condições de tempestades severas e persistentes (e.g. altura significativa da onda elevada) ou associado a outras situações de níveis de mar elevados (e.g. derivados de *storm surge*) a erosão da praia e consequente suavização do perfil de praia leva a que a ação das ondas alcance a duna frontal e, conseqüentemente, massas de água e sedimento sobrepõem e excedem a crista da duna frontal ou a cota mais elevada da barreira natural ou estrutura de proteção costeira, verificando-se assim ocorrência de galgamento (Donnelly *et al.*, 2006). O galgamento pode ser ainda um processo sequente, após episódios de erosão severos que levam a uma abertura na barreira natural e, conseqüentemente, ao transbordo de massas de água e sedimento para o interior lagunar. O potencial de ocorrência de galgamentos aumenta para situações em que as tempestades coincidam com períodos de marés-vivas (Davidson-Arnott, 2010).

O interesse em estudos relativamente aos processos que envolvem galgamentos em sistemas de barreiras disparou nos anos 60 e 70 do século XX. Esses estudos focaram-se na análise de processos de galgamento (e.g. Leatherman, 1976; Cleary e Hosier, 1979; Orford e Carter, 1984), determinação e registo de volumes de erosão e acreção ao longo de barreiras arenosas (e.g. Hayes, 1967; Dolan e Hayden, 1981) e caracterização dos sedimentos depositados por ação de galgamento desde a crista da berma até à zona interior da barreira (e.g. Pierce, 1970; Schwartz, 1975; Leatherman, *et al.*, 1977). Por outro lado, diversos estudos incidiram na

análise dos fatores que controlam a ocorrência de galgamento, tais como, condições marítimas (e.g. Fisher *et al.*, 1974), topografia da praia (e.g. Leatherman *et al.*, 1976; Matias *et al.*, 2009), estruturas de engenharia (e.g. Hayden e Dolan, 1977), batimetria costeira (e.g. Ritchie e Penland, 1988), edifícios na frente costeira (e.g. Hall *et al.*, 1990), orientação da costa em relação à tempestade (e.g. Fletcher *et al.*, 1995), localização de caminhos pedonais e estradas (e.g. Nordstrom e Jackson, 1995), elevação da zona interior da praia emersa (e.g. Morton e Sallenger, 2003) e morfologia das dunas (e.g. Donnelly e Sallenger, 2007).

Até à data os estudos com foco nos fenómenos de erosão e/ou galgamento com aplicação na zona em estudo, maioritariamente na Península do Ancão e Ilha da Barreta, são diversos. Destes, são de evidenciar os estudos realizados para a avaliação de vulnerabilidade costeira a erosão e/ou galgamento (Matias *et al.*, 1997; Garcia *et al.*, 2009; Rodrigues *et al.*, 2012; Vousdoukas *et al.*, 2012), determinação de linhas de proteção (*set-back lines*) associadas a perigos costeiros (Ferreira *et al.*, 2006), determinação dos fatores que controlam a frequência e intensidade de galgamento (Matias *et al.*, 2010), definição de *thresholds* de impacto de tempestades (Almeida *et al.* 2012), previsão da ocorrência de galgamento e das consequências morfológicas resultantes (Matias *et al.*, 2014, 2014b) e avaliação de risco costeiro e identificação de hotspots induzidos por tempestades (Ferreira *et al.*, 2016b; Ferreira *et al.*, 2018; Plomaritis *et al.*, 2018; Viavattene *et al.*, 2015b e 2018). Uma vez que os fenómenos de erosão e galgamento consistem em processos relevantes de acreção e/ou erosão naturais que fomentam alterações significativas em sistemas costeiros é indispensável a avaliação de vulnerabilidade costeira a este tipo de fenómenos naturais.

Como descrito em Ferreira *et al.* (2009) a vulnerabilidade costeira é considerada como uma função do perigo representado pelos agentes forçadores (vento, ondas e níveis de maré) que favorece a predisposição de seres vivos, infraestruturas e/ou habitats a serem afetados por tempestades marítimas. No contexto geomorfológico, a vulnerabilidade explica a modificação do substrato costeiro (e.g. a resposta morfodinâmica da zona costeira a tempestades) (Jiménez *et al.*, 2009). A probabilidade de uma dada ameaça ocorrer dentro de um determinado período de tempo, é designada por perigo (Ferreira *et al.*, 2009), e assim sendo representa um nível de ameaça à vida, à saúde, a infraestruturas ou ao meio ambiente (Rodrigues *et al.*, 2012). As duas componentes fundamentais de qualquer perigo natural são

a magnitude e a frequência (Doornkamp, 1998). A magnitude da resposta da zona costeira às tempestades depende tanto da magnitude dos agentes forçadores (propriedades das tempestades) como das características do recetor (geomorfologia costeira) (Jiménez *et al.*, 2009). Consequentemente, para obter a vulnerabilidade dos regimes de colisão e galgamento é necessário determinar as condições das potenciais tempestades (i.e., níveis de *run-up*) e ter conhecimento das características dos parâmetros morfológicos costeiros que poderão ser afetados por tais condições energéticas (i.e., elevações da base e do topo da duna) (Rodrigues *et al.* 2012).

Com a propagação das ondas desde ao largo até à costa grande parte da energia das ondas é dissipada ao entrar na zona de surf através do processo de rebentação das ondas. No entanto, uma percentagem dessa energia é transferida pelo espraio da onda na face de praia (Hunt, 1959). O nível de *run-up* das ondas consiste na elevação máxima, variável no tempo, atingida no limite do espraio da onda. Sendo o principal mecanismo das ondas condutor da hidromorfodinâmica na face de praia (Elfrink e Baldock, 2002) o conhecimento dos níveis de *run-up* é de grande relevância para o estudo das trocas sedimentares que ocorrem ao longo da zona de espraio (Masselink e Hughes, 1998; Pu *et al.*, 2000), que são responsáveis pelas modificações morfológicas relativamente rápidas que se observam nesta zona (Puleo *et al.*, 2000; Masselink e Puleo, 2006; Blenkinsopp *et al.*, 2011). A previsão precisa dos níveis de *run-up* máximos é essencial pois a zona de espraio é considerada como uma região altamente energética em termos de trocas sedimentares. Sendo que, o *run-up* desempenha um papel crítico em termos de erosão dunar durante condições de tempestade (Sallenger, 2000; Ruggiero *et al.*, 2001) e de galgamento de barreiras naturais ou estruturas artificiais (van der Meer e Stam, 1992). Assim, o conhecimento dos níveis de *run-up* máximos é substancial na previsão dos impactos de tempestades extremas em sistemas de praias naturais, infraestruturas ou estruturas de proteção costeira e, consequentemente, fundamental para o sucesso no planeamento e gestão costeira.

As estimativas de níveis de *run-up* têm sido largamente aplicadas para a avaliação e/ou previsão de erosão em zonas costeiras urbanizadas (Ruggiero *et al.*, 2001), erosão em arribas devido a tempestades extremas (Sallenger *et al.*, 2002), inundação em áreas costeiras (Benavente *et al.*, 2006), resposta de sistemas costeiros a furacões (Stockdon *et al.*, 2007) e

perigo de galgamento (Rodrigues *et al.*, 2012; Vousdoukas *et al.*, 2012). Por outro lado, as estimativas de níveis de *run-up* também foram utilizadas para a definição de limites de condições hidrodinâmicas acima dos quais é expectável impacto de tempestades (e.g. colisão e galgamento) em zonas costeiras arenosas (Almeida *et al.*, 2012), assim como, para a definição de potencial de galgamento com base na comparação dos níveis de *run-up* com a elevação das dunas no momento do estudo (Matias *et al.*, 2014) ou com a elevação das dunas na posição da linha de recuo (*set-back line*) associada aos efeitos de evolução da linha de costa, de aceleração do Nível Médio do Mar e de uma tempestade com período de retorno de 50 anos (Ferreira *et al.*, 2006).

O desenvolvimento de fórmulas empíricas para a determinação de *run-up*, onde os níveis de *run-up* máximos são obtidos em termos de  $R_{2\%}$  (*run-up* excedido por 2% das ondas incidentes), teve início nos anos 60 do século XX, com o estudo desenvolvido em laboratório por Hunt (1959). Posteriormente vários autores desenvolveram uma grande diversidade de trabalhos científicos com o intuito de atingirem os mesmos objetivos. Estes trabalhos foram realizados tanto em laboratório (e.g. Battjes, 1974b; Mase, 1989; van der Meer e Stam, 1992; Hedges e Mase, 2004; Hughes, 2004) como no campo (Guza e Thornton, 1982; Holman, 1986; Nielsen e Hanslow, 1991; Ruggiero *et al.*, 2001; Stockdon *et al.*, 2006; Vousdoukas *et al.*, 2012). Para o cálculo de níveis de *run-up* sobre diversas condições de agitação marítima e com aplicação em sistemas de praias naturais sem estruturas de proteção aderente as formulações existentes foram desenvolvidas por Guza e Thornton (1982), Holman (1986), Nielsen e Hanslow (1991), Ruggiero *et al.* (2001), Stockdon *et al.* (2006), Teixeira (2009) e Vousdoukas *et al.* (2012).

Matias *et al.* (2012) após testarem 12 equações de *run-up* identificaram a equação de Stockdon *et al.* (2006) como a melhor para prever condições de potencial de galgamento em sistemas de barreiras cascalhentas. Blenkinsopp *et al.* (2016) complementaram esse estudo através da aplicação das mesmas equações em sistemas de barreiras arenosas, recomendando a utilização das equações de van der Meer e Stam (1992) ou de Stockdon *et al.* (2006) para previsões de ocorrência de galgamento. Contudo, estudos com análises de *run-up* realizados com aplicação no sistema de ilhas e penínsulas barreira da Ria Formosa, nomeadamente na Península do Ancão (Almeida *et al.*, 2012; Vousdoukas *et al.*, 2012) e Ilha da Barreta (Matias

*et al.*, 2014) atingiram outras conclusões. Das duas equações de *run-up* mais amplamente utilizadas para a previsão dos regimes de impacto de tempestades em sistemas de praias naturais, i.e., as equações de Holman (1986) e de Stockdon *et al.* (2006), a que apresentou os melhores resultados de acordo com os estudos realizados na zona de estudo, foi a equação de Holman (1986). Mais concretamente, a equação de Holman (1986) previu corretamente 91% dos regimes de impacto de tempestades observados (Almeida *et al.*, 2012). Por outro lado, a equação de Stockdon *et al.* (2006) previu incorretamente 55 % dos regimes observados (Almeida *et al.*, 2012) e subestimou tanto a ocorrência de galgamento como a determinação dos níveis de *run-up* (Vousdoukas *et al.*, 2012; Matias *et al.*, 2014). Sendo assim, a fórmula de Holman (1986) foi adotada para a determinação de níveis de *run-up* no presente trabalho.

O conhecimento preciso das condições forçadoras marítimas é crucial quando se pretende analisar a potencial vulnerabilidade a colisão e galgamento de zonas costeiras. A variabilidade observada ao longo dos sistemas de ilhas barreira em termos de resposta ao impacto das tempestades pode ser explicada pelos efeitos combinados da variabilidade morfológica longilitoral das praias e dunas relativamente à intensidade das condições forçadoras marítimas (Stockdon *et al.*, 2007). Estas ideias são fundidas num modelo simples baseado na relação relativa entre a elevação de uma barreira arenosa e os níveis de água induzidos por tempestades (Sallenger, 2000).

A natureza da resposta dos sistemas costeiros a tempestades marítimas é frequentemente baseada na abordagem categórica de impacto de tempestades, proposta por Sallenger (2000), que faz a distinção entre regimes de *swash*, colisão, galgamento e inundação (Figura 4.1). Sallenger (2000) desenvolveu este modelo de regimes de impacto de tempestades com o objetivo de categorizar as possíveis inter-relações entre os níveis mínimos ( $R_{low}$ ; Figura 4.1) e máximos ( $R_{high}$ : nível de *run-up* +  $NivM$  – nível do mar: nível de maré + storm surge, *cf.* Capítulo 3; Figura 4.1) de atuação de esprai e as elevações de características morfológicas críticas das ilhas barreiras, como a base e o topo das dunas ( $D_{base}$  e  $D_{topo}$ , respetivamente; Figura 4.1). Assim, os regimes de impacto de tempestades são definidos consoante a variação dos níveis de  $R_{high}$  e  $R_{low}$  relativamente às elevações de  $D_{topo}$  e  $D_{base}$  (Figura 4.1; Sallenger, 2000). No presente trabalho serão apenas abordados os regimes de colisão e de galgamento.

De acordo com a abordagem de Sallenger (2000) é expectável que ocorra o regime de colisão quando os níveis de água totais induzidos por tempestade ( $R_{high}$ ) atingem e erodem a base da duna ( $D_{base}$ ) mas não excedem o topo da duna ( $D_{topo}$ ). Durante o regime de colisão pode desenvolver-se uma escarpa na base da duna que gradualmente vai recuando devido a quedas episódicas da face de duna derivadas do embate das ondas (van Gent *et al.*, 2008; Figura 4.1 (2)). Progressivamente, com a continuação do aumento de  $R_{high}$  e consequente transbordo da crista do cordão dunar ( $D_{topo}$ ), verifica-se o regime de galgamento. Durante este regime a ação das ondas é principalmente responsável pelos processos de erosão sedimentar do topo da duna, transportando esses sedimentos erodidos para a margem interior da respetiva duna (Ciavola *et al.*, 2014; Figura 4.1 (3)).

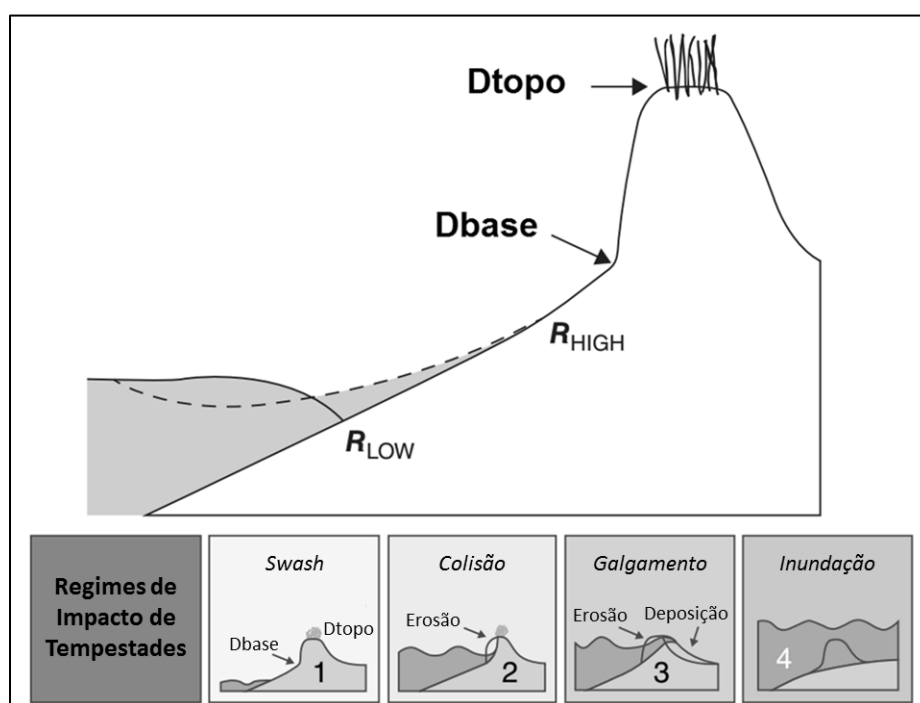


Figura 4.1 Esquema com descrição das variáveis utilizadas para categorização dos impactos de tempestades em ilhas barreira e ilustrações dos Regimes de Impacto de Tempestades: Swash (1); Colisão (2); Galgamento (3) e Inundação (4).  $D_{topo}$ : topo da duna;  $D_{base}$ : base da duna;  $R_{high}$ : nível máximo de *run-up*;  $R_{low}$ : nível mínimo de *run-up* (Adaptado de Sallenger, 2000 e Ciavola *et al.*, 2014).

A abordagem de Sallenger (2000) é usada extensivamente por ser um método simples e de rápida aplicação utilizado para estimar os efeitos de tempestades em sistemas de ilhas barreira e, por outro lado, porque as variáveis requeridas para a sua aplicação são facilmente adquiridas, modeladas ou extraídas. Uma das maiores limitações na aplicação da abordagem de Sallenger (2000) é a necessidade de estimativas precisas dos níveis de *run-up*. A precisão

da maioria das fórmulas empíricas existentes é ainda restrita pois a suas calibrações são baseadas apenas em conjuntos de dados limitados, à exceção das fórmulas de Holman (1986) e de Stockdon *et al.* (2006) que se baseiam num conjunto substancial de dados de observação de campo (Ciavola *et al.*, 2014). Por outro lado, as equações de *run-up* são baseadas predominantemente no declive da face de praia e não consideram outros parâmetros morfológicos da praia, tais como, a presença de larguras de bermas de praia e de face de duna bem desenvolvidas (Plant e Stockdon, 2012; Ciavola *et al.*, 2014). Os processos de infiltração e tensão de cisalhamento reduzem as velocidades de *run-up* ao longo das bermas impedindo que a ação das tempestades atinja as dunas em zonas costeiras caracterizadas por bermas com larguras bem desenvolvidas (Horn e Ling, 2006; Ciavola *et al.*, 2014). A não consideração destes parâmetros pode influenciar consideravelmente as estimativas dos níveis de *run-up* e, conseqüentemente, os regimes de impacto de tempestade. Assim, no presente trabalho, procurou-se perceber a influência do desenvolvimento acentuado de larguras de berma e de face de duna na determinação dos regimes de colisão e galgamento segundo a abordagem de Sallenger (2000). A negligência de outros elementos potencialmente importantes também já foi reconhecida, como são exemplos, a presença de barras de areia submersas que afetam os níveis de *run-up* (Sedrati *et al.*, 2011; Cox *et al.*, 2013) e a vegetação fixa ao longo das bermas que diminui as velocidades de *run-up* devido ao aumento de atrito sobre as superfícies das plantas (Ciavola *et al.*, 2014). Particularmente, Sedrati *et al.* (2011) deduziram que a ocorrência de galgamento está fortemente relacionada com a presença e processos de migração de barras submersas que contribuem para a atenuação da ação das ondas. No entanto, estes elementos não foram abordados no presente estudo, mas realça-se a importância do seu estudo e incorporação em estudos futuros.

A abordagem de Sallenger (2000) consiste num modelo conceptual meramente descritivo, segundo o qual são descritas e classificadas as respostas dos sistemas costeiros à ação de tempestades com base na compreensão física existente relativamente às respetivas respostas (Ciavola *et al.*, 2014). São alguns os estudos (*e.g.* Stockdon *et al.*, 2007; Plant e Stockdon, 2012; Ciavola *et al.*, 2014; Long *et al.*, 2014) que evidenciam a necessidade e importância de complementar este método com análises quantitativas das alterações observadas nos sistemas costeiros derivadas dos efeitos de tempestades marítimas. Stockdon *et al.* (2007) e Long *et al.* (2014) testaram quantitativamente as capacidades preditivas do modelo de

regimes de impacto de tempestades de Sallenger (2000) e apontaram para as causas possíveis na origem da variabilidade morfológica longilitoral das praias e dunas à intensidade das condições forçadoras marítimas. Plant e Stockdon (2012) demonstraram que este modelo conceptual descritivo, a partir do qual se obtém previsões qualitativas da resposta de praias a tempestades, pode ser reformulado através de Redes Bayesianas de forma a fornecer previsões quantitativas e hábeis das alterações morfológicas em praias e dunas derivadas da ação de tempestades marítimas. No presente trabalho, a análise quantitativa em termos de resposta do sistema de ilhas e penínsulas barreira em estudo ao impacto de tempestades é focado no capítulo 5 e envolve a utilização de modelos quantitativos.

Neste capítulo, o primeiro objetivo consiste na obtenção de níveis de *run-up* máximos ( $R_{high}$ ) para períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos. Estes níveis foram obtidos com base na análise probabilística das ocorrências de máximos anuais de  $R_{high}$  para diferentes classes de pendor de face de praia, ao longo de uma série temporal de 19 anos. O segundo objetivo abrange a determinação dos regimes de colisão e galgamento segundo a abordagem de Sallenger (2000) com base na interpretação da relação entre os níveis de  $R_{high}$  e os dados morfológicos de elevação das barreiras em estudo. Posteriormente as previsões foram comparadas contra evidências morfológicas ao longo da zona de estudo de forma a avaliar o rigor das capacidades de previsão do método de Sallenger (2000). Por último, o terceiro objetivo consta na apresentação de uma adaptação à aplicação do regime de impacto de tempestades proposto por Sallenger (2000) para representação de resultados finais de vulnerabilidade a colisão e galgamento na zona de estudo.

## 4.2 Métodos

### 4.2.1 Níveis de Run-up máximos

As estimativas dos níveis de *run-up* máximos ( $R_{high}$ ) previsíveis a atuar na zona de estudo são imprescindíveis para obter a previsão dos regimes de colisão e de galgamento. Os cálculos de  $R_{high}$  requerem o conhecimento de condições de agitação marítima ( $H_s$  – Altura significativa e  $T_p$  – Período de pico das ondas), nível de mar ( $NivM$ ) e de um parâmetro

morfológico ( $\tan \beta$  – Pendor da face de praia) para aplicação em fórmulas empíricas (equações 1 a 3). As referidas condições e parâmetro foram determinados de acordo com o descrito no capítulo 3 do presente trabalho.

Conforme justificado anteriormente a determinação dos níveis de *run-up* ( $R_{2\%}$ , m) na zona de estudo foi realizada com base na equação de Holman (1986):

$$R_{2\%} = H_s(0.83\xi + 0.2) \quad (1)$$

Onde  $H_s$  é a altura significativa das ondas (m) e  $\xi$  é um parâmetro adimensional, conhecido por número de *Iribaren* (Battjes, 1974) determinado de acordo com a seguinte equação:

$$\xi = \frac{\tan \beta}{\left(\frac{H_s}{L}\right)^{1/2}} \quad (2)$$

Onde  $\tan \beta$  é o pendore da face de praia e  $L$  é o comprimento de onda definido por  $gT^2/2\pi$  (onde  $g$  é a aceleração da gravidade e  $T$  foi considerado como o período de pico –  $T_p$  (s)).

Os níveis de *run-up* máximos ( $R_{high}$ , m) foram obtidos através da adição dos valores de  $NivM$  (nível do mar, ou seja, somatório da componente de maré astronômica prevista e os níveis de *storm surge*; cf. Capítulo 3) aos resultados da equação (1):

$$R_{high} = R_{2\%} + NivM \quad (3)$$

A previsão dos regimes de colisão e galgamento neste estudo teve base na análise das consequências de tempestades associadas a níveis de  $R_{high}$  com períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos para diferentes classes de pendore de face de praia ([0.06-0.07]; [0.08-0.09]; [0.10-0.11]; [0.12-0.13]; [0.14-0.15]; [0.16-0.17]) tanto para condições de Este-Sudeste (E-SE) como de Oeste-Sudoeste (O-SO). Todos os cálculos realizados para obtenção dos referidos níveis de  $R_{high}$  foram desenvolvidos em MATLAB r2007b® através de linguagem numérica em scripts. Nos parágrafos seguintes será descrito a abordagem adotada.

Inicialmente através da aplicação dos parâmetros oceanográficos ( $H_s$ ,  $T_p$  e  $NivM$ ) da base de dados contínua compilada anteriormente (cf. capítulo 3) e do valor médio de cada classe de pendore nas equações (1), (2) e (3) foram determinados os níveis de *run-up* máximos ( $R_{high}$ ) de 3 em 3 horas ao longo de 19 anos (1993 a 2012) para cada classe de pendore de

face de praia. Às matrizes resultantes do procedimento anterior foram encontrados os respectivos máximos anuais, aos quais foram ajustadas duas funções de distribuição de probabilidade FT I – *Gumbel* e FT III – *Weibull*. A função de distribuição de probabilidade que apresentou o melhor ajuste aos dados foi a utilizada no presente trabalho para posterior obtenção de níveis de  $R_{high}$  para diferentes períodos de retorno. Posteriormente, e uma vez que a propagação da agitação marítima na zona de estudo é fortemente influenciada pela refração das ondas, a determinação de *run-up* também reflete esta influência, em especial no flanco oriental da zona de estudo. Deste modo, a base de dados oceanográficos ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $Dir$  e  $NivM$ ) com frequência de 3 horas desde 1993 a 2012 (*cf.* capítulo 3) foi dividida em duas: uma com dados correspondentes a condições de E-SE ( $69^\circ$  a  $180^\circ$ ) utilizada nos cálculos de *run-up* no flanco oriental e outra com casos de O-SO ( $180^\circ$  a  $342^\circ$ ) para os cálculos no flanco ocidental.

Tendo em conta a amplitude de variação dos pendores de face de praia ao longo da zona de estudo, foram definidas 6 classes de pendor ([0.06-0.07]; [0.08-0.09]; [0.10-0.11]; [0.12-0.13]; [0.14-0.15]; [0.16-0.17]) de forma a agrupar este parâmetro morfológico dentro das secções de 100 metros e a sintetiza-lo ao longo da zona de estudo.

Assim, os níveis de  $R_{high}$  foram determinados com base nos parâmetros oceanográficos para condições de E-SE e O-SO e para 6 classes de pendor de face de praia. A partir dos níveis de  $R_{high}$  resultantes do procedimento anterior foram identificados os máximos anuais de  $R_{high}$  por classe de pendor tanto para condições de E-SE como para condições de O-SO. Com base nas distribuições de probabilidade de cada conjunto de dados de máximos anuais de  $R_{high}$  e nas respectivas retas de ajuste da função de distribuição utilizada foram extraídos os níveis de  $R_{high}$  para períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos que correspondem à ocorrência de probabilidade de 0.8, 0.9, 0.96 e 0.98, respetivamente. Todo este procedimento foi realizado com o auxílio de uma ferramenta de ajuste de distribuição de probabilidade “*dffitool*” existente no MATLAB r2007b®.

É de referir que os procedimentos que se seguem no presente capítulo englobam apenas a análise dos níveis de  $R_{high}$  para PR 5, 25 e 50 anos, uma vez que, os níveis de  $R_{high}$  para PR de 10 anos serão somente utilizados, juntamente com os de para PR 50 anos, nos cálculos de extensão e profundidade de galgamento abordados no capítulo 5.

A cada secção de 100 m ao longo da zona de estudo foi atribuído o respetivo nível de  $R_{high}$  para PR de 5, 25 e 50 anos consoante o pendor característico de cada secção. Para as áreas da Península do Ancão e Ilha da Barreta foram utilizados os resultados de  $R_{high}$  com PR de 5, 25 e 50 anos para condições de O-SO e para as áreas das Ilhas da Culatra e Armona os resultados para condições de E-SE, como referido anteriormente.

## 4.2.2. Vulnerabilidade a Colisão e a Galgamento

### 4.2.2.1 Regimes de colisão e de galgamento

Tendo em consideração os regimes de impacto de tempestades definidos por Sallenger (2000), o presente trabalho teve foco nos regimes de colisão e de galgamento e na sua aplicabilidade à zona em estudo. Consoante a variação entre o nível máximo de atuação de espraio ( $R_{high}$ ) e as elevações morfológicas críticas das barreiras ( $D_{base}$  e  $D_{topo}$ : base e o topo das dunas, respetivamente) Sallenger (2000) definiu que ocorre colisão quando o nível de  $R_{high}$  é inferior ao valor de elevação de  $D_{topo}$ , mas superior à  $D_{base}$  ( $D_{topo} > R_{high} > D_{base}$ ) e que ocorre galgamento quando o nível de  $R_{high}$  é superior à elevação de  $D_{topo}$  ( $R_{high} > D_{topo}$ ). Assim, com o aumento de  $R_{high}$  a atuação de espraio das ondas pode causar erosão dunar sobre condições de colisão e se progredir para condições de galgamento pode resultar no transporte de sedimento em direção a terra com deposição na margem interna lagunar. Analisando a variação dos níveis de  $R_{high}$  para PR de 5, 25 e 50 anos relativamente às elevações de  $D_{base}$  e  $D_{topo}$  em cada secção de 100 m, foram definidas as previsões dos regimes de colisão e galgamento ao longo da zona de estudo.

Com o intuito de verificar a assertividade da aplicação da abordagem de Sallenger na zona de estudo procurou-se comprovar se as previsões de colisão e galgamento obtidas para PR de 5 anos estavam em concordância com evidências morfológicas observadas nas fotografias aéreas do levantamento LiDAR de 2009. De forma a concretizar este objetivo, os critérios morfológicos considerados indicativos de ocorrência de colisão foram a existência de escarpa acentuada na zona da base da duna e/ou ausência de vegetação (Tabela 4.1). Por outro lado, a existência de bermas largas com indícios de acumulação sedimentar, formação de pré-dunas, crescimento de vegetação e/ou base de duna intacta ou com sinais de recuperação (crescimento de vegetação e acumulação de sedimento) foram indicativos de ausência de

colisão (Tabela 4.1). As observações morfológicas que apoiaram a ocorrência de galgamento foram a inexistência de vegetação e aparência de “areal lavado” em locais onde  $D_{topo} = D_{base}$  (e.g. restinga que se desenvolve na extremidade ocidental da Ilha da Barreta), e a existência de brechas transversais no cordão dunar, onde não havia vegetação e onde as elevações de  $D_{topo}$  diminuíam consideravelmente ao ponto de, até em alguns casos, possuírem a mesma elevação que  $D_{base}$  (Tabela 4.1). Morfologicamente observando, a inexistência de galgamento foi fundamentada por indícios de recuperação dunar, tais como o crescimento de vegetação e acumulação de sedimento ao longo do cordão dunar (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 Critérios morfológicos considerados para identificação de existência ou inexistência de colisão e galgamento na zona de estudo.

<b>Colisão</b>	
Existência	Inexistência
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escarpa na base da duna</li> <li>• Ausência de vegetação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bermas de praia largas</li> <li>• Formação de pré-dunas com fixação de vegetação</li> <li>• Base de duna intacta ou com vegetação</li> </ul>
<b>Galgamento</b>	
Existência	Inexistência
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausência de vegetação</li> <li>• Aparência de “areal lavado”</li> <li>• Diminuição abrupta da elevação do topo da duna</li> <li>• Brechas transversais no cordão dunar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bermas de face de duna largas</li> <li>• Crescimento de vegetação</li> <li>• Acumulação sedimentar</li> </ul>

Assim, de acordo com as observações morfológicas, foi registado para cada secção de 100 m ao longo da zona de estudo a existência ou ausência de colisão e galgamento. A partir da comparação entre estes resultados e as previsões dos regimes de colisão e galgamento com PR de 5 anos, obtidas segundo a abordagem de *Sallenger*, foi possível quantificar percentualmente para cada área em estudo (Península do Ancão e Ilhas da Barreta, Culatra e Armona) os casos em que as previsões coincidiram ou não com as observações morfológicas, tanto para o regime de colisão como para o de galgamento.

#### **4.2.2.2 Thresholds de colisão e de galgamento**

Após os resultados obtidos anteriormente foi pertinente ir de encontro à causa determinante para as diferenças obtidas entre os resultados previstos e os observados morfológicamente.

Para tal, analisou-se a relação entre a variação de larguras de berma e de duna (parâmetros morfológicos não considerados na abordagem de *Sallenger*) e a distribuição de secções em que as previsões de colisão e de galgamento coincidiram ou não coincidiram com as observações morfológicas.

Para esta análise, foram identificados os casos (secções) onde tanto as previsões para PR 5 anos, tanto segundo abordagem de *Sallenger* como para as observações morfológicas, apresentam resultados iguais, definidos como Casos de Sucesso. Os casos (secções) onde foi prevista ocorrência ou não ocorrência de regime de colisão/galgamento, mas onde a análise morfológica contrapõe esses resultados, foram designados como Casos de Erro.

Posteriormente foram determinadas as frequências de ocorrência de Casos de Sucesso e Erro por classes de larguras, tanto para colisão como para galgamento. As classes de larguras foram definidas de 5 em 5 metros desde o valor de largura mínimo ao máximo observado para cada área. Importante referir que, para a análise do regime de colisão as classes de larguras foram definidas com base nos valores de largura de berma de cada secção, e para a análise do regime de galgamento as classes de larguras foram definidas com base nos valores de largura de berma + duna de cada secção. Inicialmente as frequências de ocorrência foram determinadas para cada área em estudo e depois foram compiladas de forma a obter as frequências de Casos de Sucesso e Erro por classes de largura, tanto para colisão como para galgamento, para toda a zona de estudo. Estes resultados foram apresentados em dois histogramas, um para o regime de colisão e outro para o de galgamento. Onde, de forma a visualizar simultaneamente os Casos de Sucesso e de Erro estes foram representados, respetivamente, pelas ordenadas em Y positivas e negativas. É importante referir que a classe de larguras máxima considerada nos histogramas correspondeu ao valor máximo obtido de classe de larguras dos Casos de Sucesso. A partir da análise destes histogramas foi possível identificar os *thresholds* de colisão e galgamento, ou seja, os limites de largura de berma e de largura de berma + duna, respetivamente, a partir dos quais a determinação de regimes de colisão e galgamento na zona de estudo segundo a abordagem de *Sallenger* foi considerada duvidosa. Estes *thresholds* foram definidos pela classe de larguras a partir da qual se verificou predominância dos Casos de Erro relativamente aos Casos de Sucesso.

#### **4.2.2.3 Regimes de colisão e de galgamento adaptados a thresholds**

Os *thresholds* de colisão e galgamento obtidos anteriormente foram integrados nas previsões dos regimes de colisão e galgamento para PR de 5, 25 e 50 anos determinadas no subcapítulo 4.2.2.1. Para tal, as secções que apresentavam valores de largura de berma ou de largura de berma + duna superiores aos *thresholds* de colisão ou de galgamento, respetivamente, foram identificadas como secções onde a abordagem de *Sallenger* não é aplicável. Com base nestes resultados foram criados os mapas de vulnerabilidade a colisão e a galgamento a 5, 25 ou 50 anos na zona de estudo, através do programa ArcGIS 10 ®. Para esse efeito, foram criadas duas shapefiles de linhas segmentais, representativas das secções de 100 m, sobre as fotografias aéreas do LiDAR de 2009 de cada área em estudo (Península do Ancão e Ilhas da Barreta, Culatra e Armona). Os resultados de vulnerabilidade a colisão e a galgamento foram exportados para cada uma destas shapefiles. Sendo assim representado a vulnerabilidade a colisão e a galgamento a 5, 25 ou 50 anos a cada 100 m ao longo da zona de estudo, assim como, a indicação das secções não vulneráveis e das secções onde a abordagem de *Sallenger* foi considerada sem aplicação.

## 4.3. Resultados

### 4.3.1. Níveis de *Run-up* máximos

A partir da aplicação dos dados oceanográficos da série contínua de 19 anos nas respetivas equações empíricas (eq. 1 a 3) foram obtidas 6 matrizes com os níveis de *run-up* máximos ( $R_{high}$ ) de 3 em 3 horas desde 1993 a 2012 relativamente a cada classe de pendor definida. Para cada uma destas matrizes foram encontrados os respetivos máximos anuais de  $R_{high}$  que são apresentados em anexo (ANEXO 4.I Tabela A4.I.1). Das duas funções de distribuição de probabilidade FT I – Gumbel e FT III - Weibull ajustadas a cada conjunto de máximos anuais de  $R_{high}$ , a que apresentou o melhor ajuste aos dados foi a função de Weibull (*cf.* ANEXO 4.I resultados desta análise) sendo, por conseguinte, a utilizada no presente trabalho. Importante referir que, apesar de esta análise ter sido realizada a partir da base de dados da série temporal total, a função de distribuição de probabilidade encontrada com melhor ajuste foi considerada representativa para as análises efetuadas posteriormente

que, nomeadamente, tiverem em conta a separação da base de dados entre condições de onda de E-SE e O-SO.

Posteriormente, após a separação da base de dados contínua de 19 anos em condições de E-SE e O-SO e respetiva aplicação nas fórmulas empíricas (1) a (3), foram obtidas 12 matrizes com níveis de  $R_{high}$  para cada classe de pendor tanto para condições de E-SE como de O-SO. Em anexo (ANEXO 4.II Tabela A4.II.1 e A4.II.2) são apresentados os máximos anuais de  $R_{high}$  encontrados para cada uma dessas matrizes. Em média os máximos anuais de  $R_{high}$  para condições de O-SO são cerca de 1,2 m superiores aos de para condições de E-SE, exceto em 2001 e 2007, onde os máximos anuais de  $R_{high}$  para condições de E-SE são superiores aos de O-SO para todas as classes de pendor (ANEXO 4.II Tabelas A4.II.1 e A4.II.2). O valor máximo de  $R_{high}$  obtido para condições de O-SO foi de 8,01 m em 1999 e para condições de E-SE de 6,44 m em 2003, ambos para a classe de pendor com maior inclinação [0.16-0.17] (ANEXO 4.II Tabelas A4.II.1 e A4.II.2).

A termos exemplificativos da extração dos níveis de  $R_{high}$  para períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos para cada classe de pendor tanto para condições de E-SE como de O-SO, é aqui apresentada a distribuição de probabilidade dos máximos anuais de  $R_{high}$  para a classe de pendor [0.06-0.07] para condições de E-SE com a respetiva reta de ajuste segundo a função de *Weibull* (Figura 4.2). Os níveis de  $R_{high}$  para PR de 5, 10, 25 e 50 anos correspondem ao valor da abcissa em X das probabilidades de 0.8, 0.9, 0.96 e 0.98, respetivamente (Figura 4.2). Para este caso, apresentado aqui como exemplo, os níveis de  $R_{high}$  para PR de 5, 10, 25 e 50 anos foram de 3,41, 3,6, 3,79 e 3,9 m, respetivamente (Figura 4.2 e Tabela 4.2).

Assim, seguindo este método foram extraídos os níveis de  $R_{high}$  para períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos por classe de pendor para condições de E-SE e O-SO (Tabela 4.2), através das retas de ajuste da função de *Weibull* das respetivas distribuições de probabilidade de cada uma das 12 matrizes de máximos anuais de  $R_{high}$  (ANEXO 4.II Tabelas A4.II.1 e A4.II.2). Como expectável, os níveis de  $R_{high}$  para condições de E-SE são sempre inferiores aos níveis de  $R_{high}$  para condições de O-SO (Tabela 4.2).

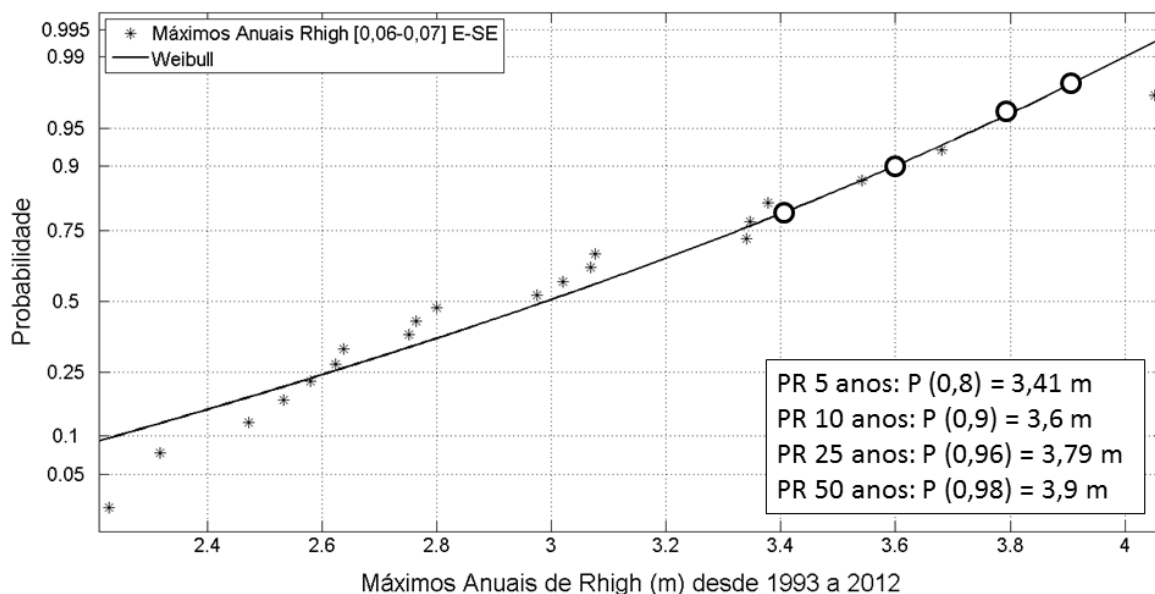


Figura 4.2 Distribuição de probabilidade dos máximos anuais de Rhigh (m) para a classe de pendor [0,06-0,07] para condições de E-SE com reta de ajuste da função de *Weibull*. Os círculos correspondem às probabilidades de 0,8, 0,9, 0,96 e 0,98 que representam os pontos de extração dos níveis de Rhigh para períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos, respetivamente.

Tabela 4.2 Níveis de Rhigh para períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos por classe de pendor para condições de E-SE e de O-SO.

<b>E-SE</b>							
Período de retorno (anos)	Classes de pendor de face da praia						
	Probabilidade [0,06-0,07]	[0,08-0,09]	[0,10-0,11]	[0,12-0,13]	[0,14-0,15]	[0,16-0,17]	
5	0,8	3,41	3,80	4,21	4,62	4,98	5,45
10	0,9	3,60	4,02	4,45	4,89	5,31	5,77
25	0,96	3,79	4,24	4,70	5,15	5,66	6,08
50	0,98	3,90	4,38	4,84	5,32	5,88	6,27

<b>O-SO</b>							
Período de retorno (anos)	Classes de pendor de face da praia						
	Probabilidade [0,06-0,07]	[0,08-0,09]	[0,10-0,11]	[0,12-0,13]	[0,14-0,15]	[0,16-0,17]	
5	0,8	4,29	4,89	5,50	6,12	6,75	7,38
10	0,9	4,52	5,16	5,80	6,47	7,14	7,81
25	0,96	4,75	5,43	6,11	6,81	7,52	8,23
50	0,98	4,89	5,59	6,29	7,02	7,75	8,48

Como referido e justificado anteriormente as análises que se seguem neste capítulo englobam apenas os resultados de níveis de Rhigh para PR de 5, 25 e 50 anos.

Analisando de forma bastante abstrata os resultados de níveis de Rhigh para PR de 5, 25 e 50 anos expectáveis para as zonas definidas dentro das áreas em estudo, de acordo com os valores médios de pendor de face de praia ( $\tan \beta$ ) característicos de cada zona (Tabela 4.3), os níveis de Rhigh no flanco ocidental (P. Ancão e I. Barreta) são cerca de 2 metros superiores relativamente aos do flanco oriental (I. Culatra e Armona) (Tabela 4.3). De toda a zona em estudo, níveis de Rhigh mais elevados são expectáveis na zona ocidental da I. da Barreta e opostamente os mais baixos na zona ocidental da I. da Armona (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 Valores médios de pendor de face de praia ( $\tan \beta$ ) para cada zona definida nas áreas da Península do Ancão e Ilhas da Barreta, Culatra e Armona e respetivos valores de níveis de Rhigh (m) para períodos de retorno de 5, 25 e 50 anos.

		$\tan \beta$	Rhigh (m)		
			Período de retorno (anos)		
			5	25	50
	Zona Ocidental	0,12			
Ancão	Zona Central	0,13	6,12	6,81	7,02
	Zona Oriental	0,13			
Barreta	Zona Ocidental	0,14	6,75	7,52	7,75
	Zona Oriental	0,12	6,12	6,81	7,02
Culatra	Zona Ocidental	0,11			
	Zona Oriental	0,10	4,21	4,70	4,84
Armona	Zona Ocidental	0,09	3,80	4,24	4,38
	Zona Oriental	0,10	4,21	4,70	4,84

Em termos de representação geográfica dos níveis de Rhigh obtidos ao longo da zona em estudo foram atribuídos para cada secção de 100 m os níveis de Rhigh para PR de 5, 25 e 50 anos (Tabela 4.2) consoante o valor de pendor característico de cada secção (*e.g.* Figura 4.3). Como se pode verificar no exemplo da Figura 4.3, à secção 67 foram atribuídos níveis de Rhigh característicos da classe de pendor [0.14-0.15] e para condições de O-SO (Tabela 4.2)

visto que esta secção possui pendor de 0.14 e está localizada na Península do Ancão, *i.e.* pertencente, ao flanco ocidental da zona de estudo.

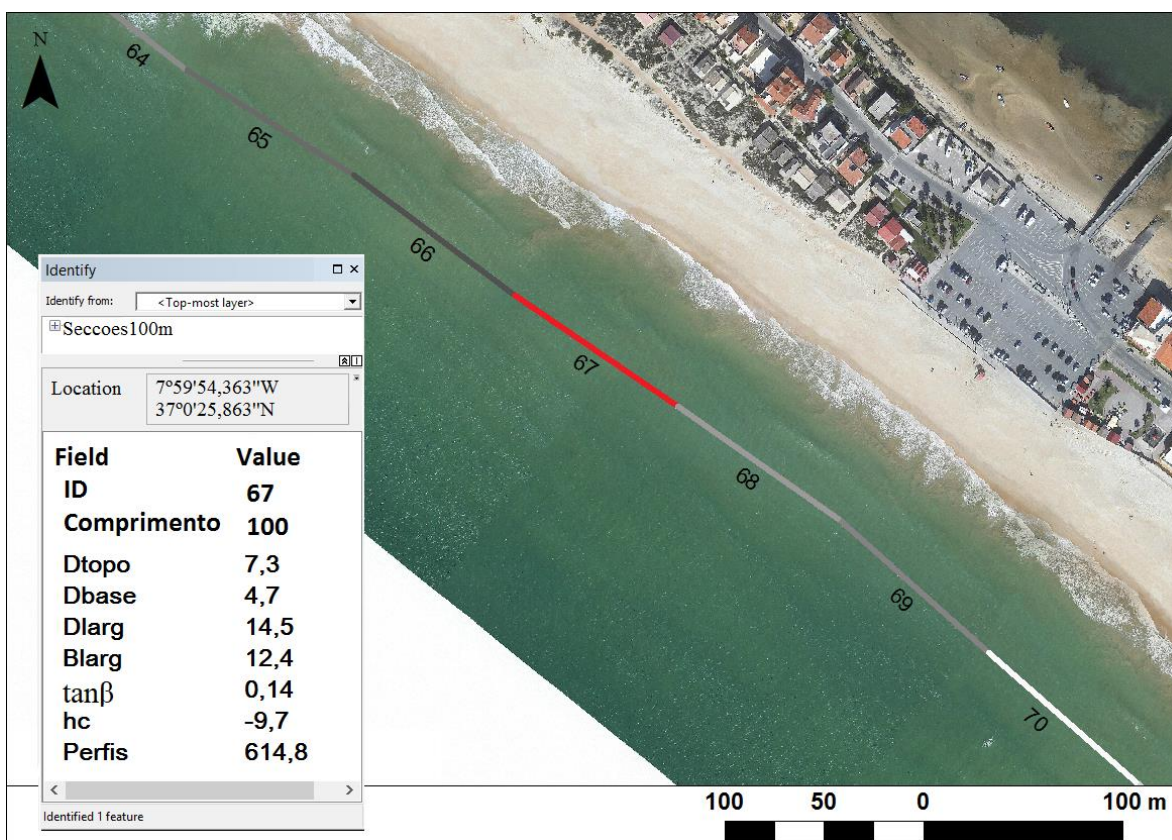


Figura 4.3 Fotografia aérea de uma pequena área da Península do Ancão (zona central da Praia de Faro) com representação de *shapefile* de linha longitudinal das secções de 100 m. Caixa de Informação com dados dos parâmetros para a área 67 e respetivos resultados de níveis de Rhigh para períodos de retorno de 5, 25 e 50 anos. Imagem de fundo adaptada das fotografias aéreas do LiDAR 2009.

## 4.3.2. Vulnerabilidade a Colisão e a Galgamento

### 4.3.2.1 Regimes de colisão e de galgamento

De acordo com observações preliminares aos resultados obtidos dos regimes de colisão e de galgamento para períodos de retorno de 5, 25 e 50 anos previstos segundo o método de Sallenger (2000) ressaltaram algumas discrepâncias relevantes relativamente ao expectado. Nomeadamente, no flanco ocidental foram vários os casos de previsões de ocorrência de colisão e galgamento em secções onde existem evidências morfológicas que corroboram exatamente o oposto. No flanco oriental, apesar das previsões de galgamento refletirem com maior precisão o expectado e sendo tal constatado através de observações morfológicas, a

quantidade de secções com previsões erróneas de ocorrência de colisão foram bastantes. Esta análise será abordada novamente e mais detalhadamente posteriormente no subcapítulo 4.3.2.3 apenas por motivos de organização do trabalho e enquadramento de raciocínio.

Quantificando percentualmente para cada área em estudo as secções nas quais as previsões de colisão e de galgamento para períodos de retorno de 5 anos, obtidas segundo abordagem de *Sallenger*, coincidiram ( $Prev = OBS$ ) ou não coincidiram ( $Prev \neq OBS$ ) com as observações morfológicas, obtiveram-se os seguintes resultados: A percentagem de secções em que as previsões corresponderam às observações morfológicas foi bastante significativa (Tabela 4.4). Inclusive, no caso de colisão na P. Ancão, e no caso de galgamento na P. Ancão e nas I. da Culatra e Armona a percentagem de secções em que  $Prev = OBS$  foi sempre igual ou superior a 80 % (Tabela 4.4). A P. Ancão foi a área em estudo com maior percentagem de secções em que  $Prev = OBS$  tanto para colisão como para galgamento (Tabela 4.4). Por outro lado, a percentagem de secções em se verificaram que as previsões não corresponderam às observações morfológicas também foi significativa (Tabela 4.4). Nomeadamente, nas I. Barreta, Culatra e Armona as previsões de colisão não coincidiram com as observações sempre para mais de 50 % dos casos (Tabela 4.4). As áreas em estudo com maior percentagem de  $Prev \neq OBS$  foram a I. Armona no regime de colisão e a I. Barreta no de galgamento (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 Percentagem de secções em que as previsões de colisão e galgamento para períodos de retorno de 5 anos segundo abordagem de *Sallenger* correspondem ( $Prev = OBS$ ) ou não ( $Prev \neq OBS$ ) às observações morfológicas nas áreas em estudo (Península do Ancão, Ilhas da Barreta, Culatra e Armona).

	Colisão		Galgamento	
	Prev = OBS	Prev $\neq$ OBS	Prev = OBS	Prev $\neq$ OBS
Ancão	82	18	89	11
Barreta	43	57	54	46
Culatra	34	66	80	20
Armona	34	66	85	15

Dado o número considerável de casos em que as previsões de colisão e galgamento não foram suportadas por observações morfológicas, foi pertinente ir de encontro a uma possível causa

relacionada com a origem destes casos, assunto que será abordado no subcapítulo que se segue.

#### 4.3.2.2 Thresholds de colisão e de galgamento

Com o estudo da relação entre a variação de larguras de berma e duna e a distribuição de secções em que as previsões de colisão e de galgamento coincidiram ou não coincidiram com as observações morfológicas foi possível obter os seguintes resultados: Com base na análise das distribuições de frequência de Casos de Sucesso e de Erro por classes de larguras de berma, para a toda a zona de estudo, relativamente ao regime de colisão (Figura 4.4) foi possível observar que a classe de larguras para a qual se verificou o maior número de ocorrências de Casos de Sucesso foi a classe com larguras de berma entre os 15 e 20 m. A frequência de Casos de Erro sobressai para secções com larguras de berma iguais ou superiores a 20 m. No entanto, é a partir de larguras de berma iguais ou superiores a 35 m que o peso dos Casos de Erro é sempre superior aos Casos de Sucesso. Sendo assim assumido como *threshold* de colisão, larguras de berma iguais ou superiores a 35 m.

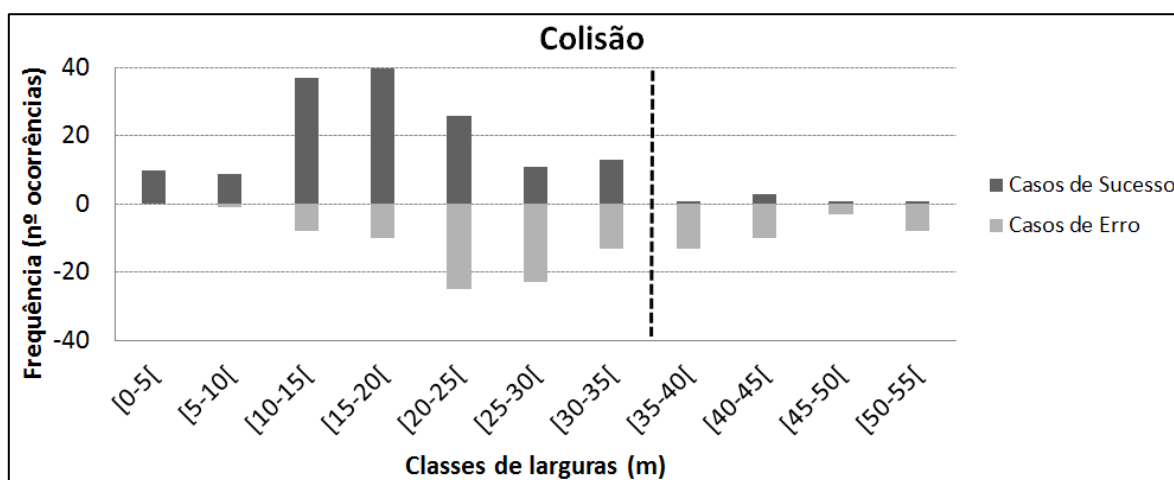


Figura 4.4 Histograma de Casos de Sucesso (ordenadas-y positivas) e de Erro (ordenadas-y negativas) por classes de larguras de berma, para toda a zona de estudo, relativamente ao regime de colisão. Linha a tracejado indica o *threshold* de colisão.

Segundo a distribuição de frequência de Casos de Sucesso e de Erro por classes de larguras de berma + duna, para a toda a zona de estudo, relativamente ao regime de galgamento (Figura 4.5) a classe de larguras com maior frequência de Casos de Sucesso foi a de larguras entre 0 e 5 m. É evidente que os Casos de Erro sobressaem a partir da classe de larguras de

berma + duna de [25-30[ mas, no entanto, os Casos de Sucesso são ainda bastante relevantes até inclusive a classe [40-45[. Assim, assumiu-se como *threshold* de galgamento, larguras de berma + duna acima de 45 m pois é a partir da classe [45-50[ que os Casos de Erro prevalecem aos casos de sucesso.

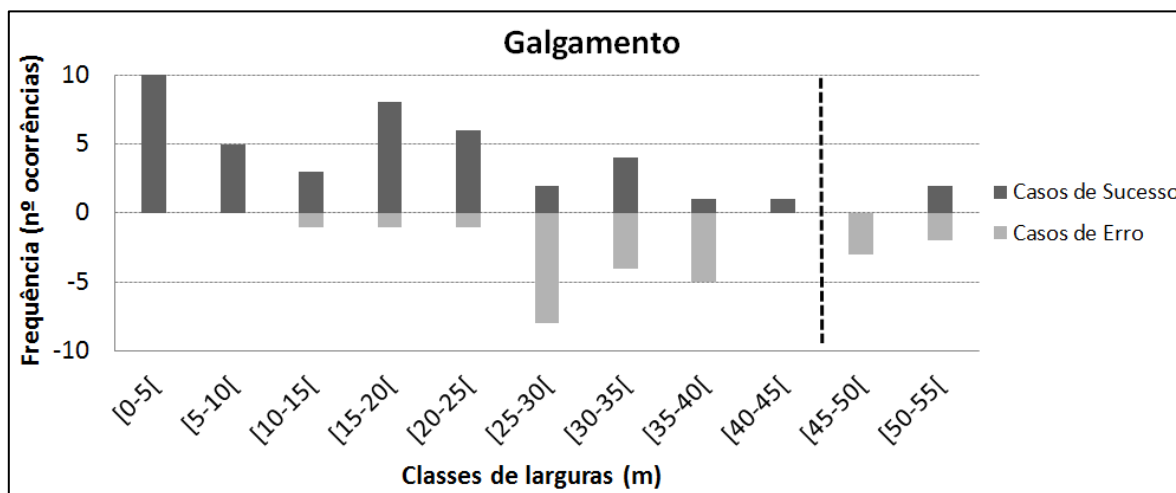


Figura 4.5 Histograma de Casos de Sucesso (ordenadas-y positivas) e de Erro (ordenadas-y negativas) por classes de larguras de berma + duna, para toda a zona de estudo, relativamente ao regime de galgamento. Linha a tracejado indica o *threshold* de galgamento.

#### 4.3.2.3 Regimes de colisão e de galgamento adaptados a *thresholds*

Com os *thresholds* de colisão e galgamento definidos foram identificadas as secções ao longo da zona de estudo caracterizadas com larguras de berma ou berma + duna acima dos respetivos *thresholds* (Figuras 4.6 a 4.9).

Na área da Península do Ancão (Figura 4.6) a análise da relação entre a ocorrência de secções com larguras de berma ou berma + duna acima dos *thresholds* de colisão ou galgamento definidos (*Threshold*; Figura 4.6 **b** e **c**) e os casos em que as evidências morfológicas observadas nas fotografias aéreas do LiDAR 2009 (OBS; Figura 4.6 **b** e **c**) refutaram as previsões de colisão e galgamento para PR 5 anos segundo a abordagem de *Sallenger* (PREV; Figura 4.6 **b** e **c**) mostra que as secções identificadas com as larguras acima dos *thresholds* definidos coincidiram na maioria a secções onde as observações morfológicas contestaram as previsões. No entanto, tanto para colisão como para galgamento, algumas secções identificadas como casos de erro não foram enquadradas na categoria de secções com

larguras de berma ou berma + duna acima dos *thresholds* de colisão ou galgamento, respetivamente (Figura 4.6).

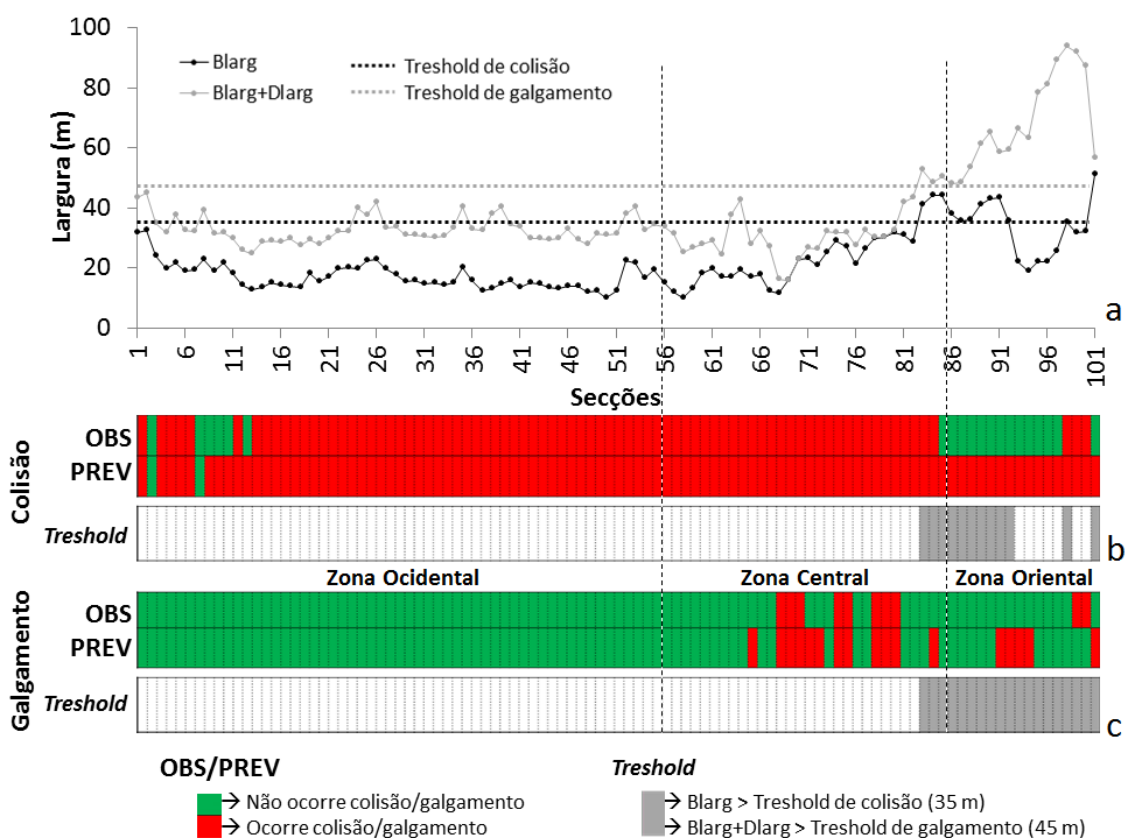


Figura 4.6 (a) Variação longitudinal das larguras de berma (Blarg) e de berma + duna (Blarg+Dlarg) na Península do Ancão, com identificação dos *thresholds* de colisão (linha a tracejado preta) e galgamento (linha a tracejado cinzenta). (b) Identificação de colisão segundo observações morfológicas (OBS), regime de colisão para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de *Sallenger* (PREV) e representação das secções com largura de berma superior ao *threshold* de colisão (35 m) (*Threshold*). (c) Identificação de galgamento segundo observações morfológicas (OBS), regime de galgamento para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de *Sallenger* (PREV) e representação das secções com largura de berma+duna superior ao *threshold* de galgamento (45 m) (*Threshold*).

Na Ilha da Barreta a análise da relação entre a ocorrência de secções com larguras acima dos *thresholds* definidos e casos onde as observações morfológicas não corresponderam às previsões (Figura 4.7) mostra que as secções definidas como casos de erro, onde as previsões de acordo com *Sallenger* não coincidiram com as observações morfológicas, coincidem maioritariamente a secções com larguras acima dos *thresholds* de colisão e galgamento (Figura 4.7).

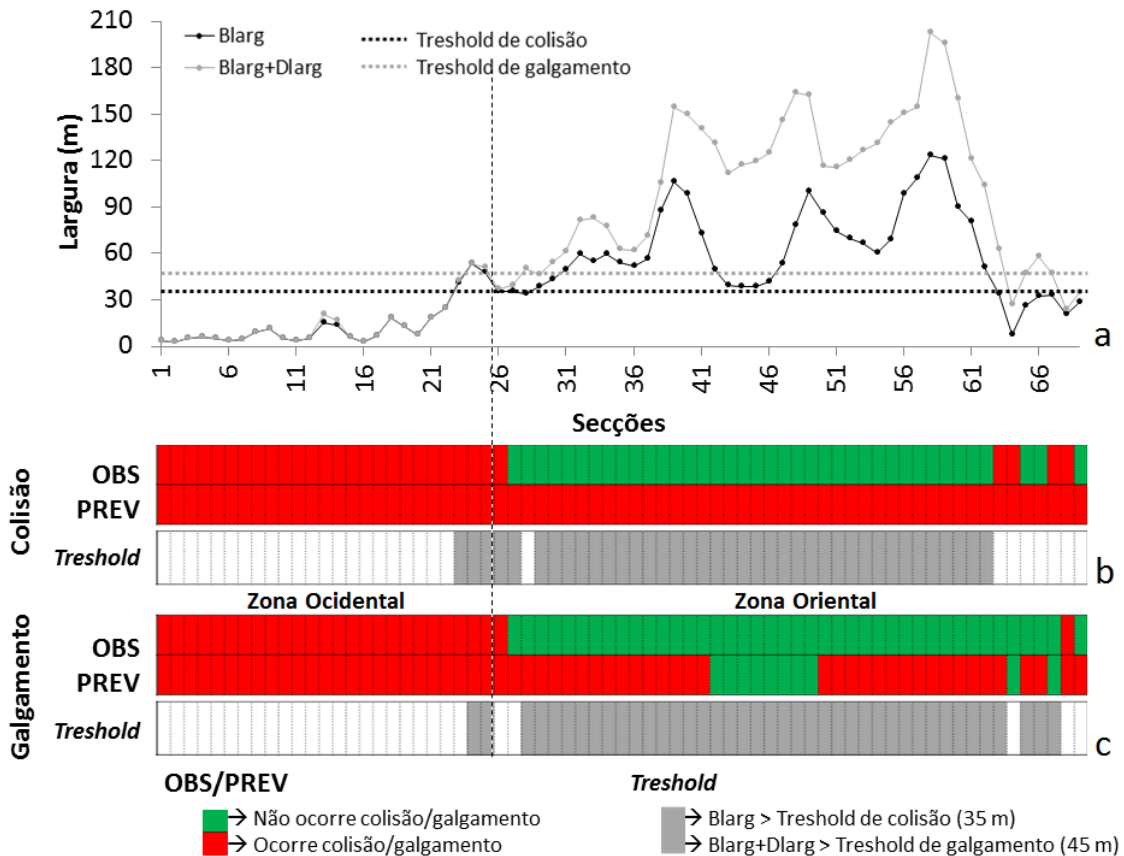


Figura 4.7 (a) Variação longitudinal das larguras de berma (Blarg) e de berma + duna (Blarg+Dlarg) na Ilha da Barreta, com identificação dos thresholds de colisão (linha a tracejado preta) e galgamento (linha a tracejado cinzenta). (b) Identificação de colisão segundo observações morfológicas (OBS), regime de colisão para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de *Sallenger* (PREV) e representação das secções com largura de berma superior ao *threshold* de colisão (35 m) (*Threshold*). (c) Identificação de galgamento segundo observações morfológicas (OBS), regime de galgamento para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de *Sallenger* (PREV) e representação das secções com largura de berma+duna superior ao *threshold* de galgamento (45 m) (*Threshold*).

A relação entre a distribuição de secções com larguras acima dos *thresholds* de colisão e galgamento e a ocorrência de secções onde as evidências morfológicas não coincidiram com as previsões segundo a abordagem de *Sallenger* na Ilha da Culatra (Figura 4.8) não é tão distinta quanto à das áreas do flanco ocidental. Os casos de erro obtidos para o regime de colisão coincidiram com algumas secções identificadas com larguras acima dos *thresholds* de colisão, mas, no entanto, são diversas as secções para as quais não se verifica tal relação. No caso do regime de galgamento a maioria das secções identificadas com larguras acima do *threshold* de galgamento corresponderam a secções onde as previsões coincidiram com as observações morfológicas (Figura 4.8).

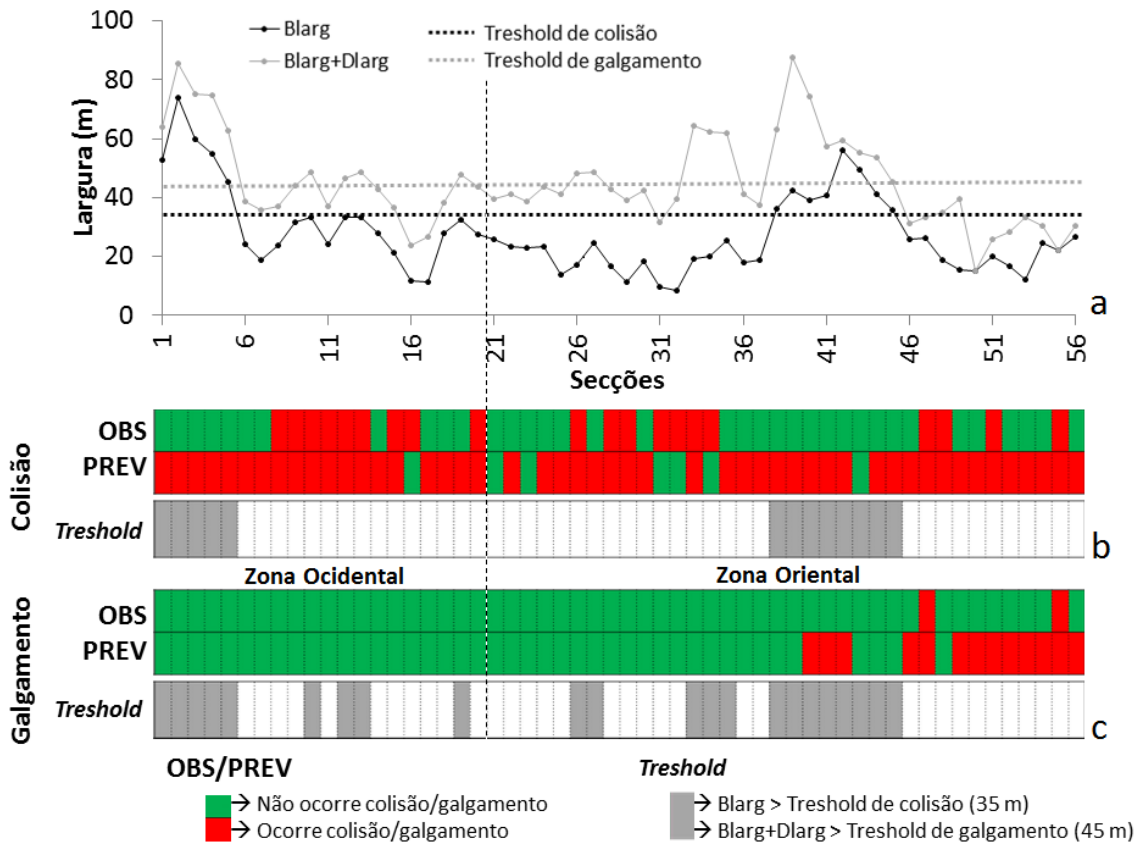


Figura 4.8 (a) Variação longilitoral das larguras de berma (Blarg) e de berma + duna (Blarg+Dlarg) na Ilha da Culatra, com identificação dos thresholds de colisão (linha a tracejado preta) e galgamento (linha a tracejado cinzenta). (b) Identificação de colisão segundo observações morfológicas (OBS), regime de colisão para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de *Sallenger* (PREV) e representação das secções com largura de berma superior ao *threshold* de colisão (35 m) (*Threshold*). (c) Identificação de galgamento segundo observações morfológicas (OBS), regime de galgamento para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de *Sallenger* (PREV) e representação das secções com largura de berma+duna superior ao *threshold* de galgamento (45 m) (*Threshold*).

Na Ilha da Armona (Figura 4.9) a relação entre ocorrência de secções com larguras acima dos *thresholds* de colisão e galgamento e a existência de casos de erro é praticamente inexistente. No caso do regime de colisão foram poucas as secções identificadas acima do *threshold* de colisão relativamente à quantidade significativa de casos de erro verificados. No regime de galgamento todas as secções identificadas acima do *threshold* de galgamento coincidiram com casos de sucesso (Figura 4.9).

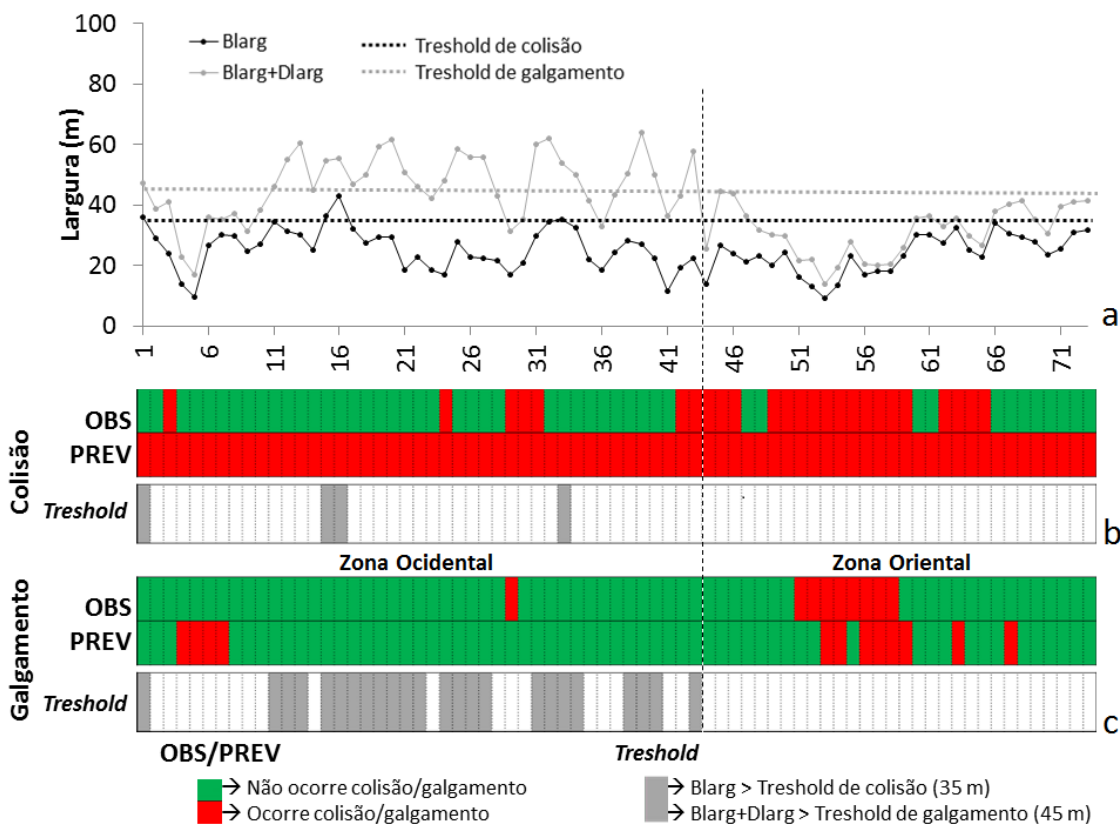


Figura 4.9 (a) Variação longitudinal das larguras de berma (Blarg) e de berma + duna (Blarg+Dlarg) na Ilha da Armona, com identificação dos thresholds de colisão (linha a tracejado preta) e galgamento (linha a tracejado cinzenta). (b) Identificação de colisão segundo observações morfológicas (OBS), regime de colisão para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de *Sallenger* (PREV) e representação das secções com largura de berma superior ao *threshold* de colisão (35 m) (*Threshold*). (c) Identificação de galgamento segundo observações morfológicas (OBS), regime de galgamento para PR 5 anos previsto segundo a abordagem de *Sallenger* (PREV) e representação das secções com largura de berma+duna superior ao *threshold* de galgamento (45 m) (*Threshold*).

Com a incorporação dos *thresholds* de colisão e galgamento definidos no presente trabalho aos respetivos regimes de impacto de tempestades em estudo foram criados os mapas de vulnerabilidade a colisão e a galgamento para períodos de retorno de 5, 25 e 50 anos nas áreas da Península do Ancão e Ilhas da Barreta, Culatra e Armona (Figuras 4.10 a 4.13).

Com base na análise do mapa de vulnerabilidade na Península do Ancão (Figuras 4.10) pode observar-se que praticamente toda a extensão desta área é vulnerável a colisão para eventos de tempestade com períodos de retorno de 5 anos. À exceção de 2 secções na extremidade poente da zona ocidental: uma com vulnerabilidade a colisão para PR 25 anos e outra para PR 50 anos (Figura 4.10).

A abordagem de *Sallenger* foi considerada sem aplicação para previsão do regime de colisão na área da P. Ancão no final do extremo nascente da zona central (últimas 3 secções) e para sensivelmente mais de metade da zona oriental (Figura 4.10).

Toda a extensão da zona ocidental da P. Ancão não é vulnerável a galgamento, à exceção de 1 secção vulnerável a galgamento para PR 25 anos. A zona central da P. Ancão é a zona que apresenta maior variabilidade longitudinal em termos de vulnerabilidade a galgamento. Apesar de não se verificar vulnerabilidade a galgamento em algumas secções no extremo poente da zona central, na restante extensão desta zona todas as secções são vulneráveis a galgamento para PR 5, 25 ou 50 anos, com maioria para PR 5 anos (Figura 4.10).

Relativamente ao regime de galgamento na P. Ancão a abordagem de *Sallenger* foi considerada sem aplicação no final do extremo nascente da zona central (últimas 3 secções) e em toda a extensão da zona oriental (Figura 4.10).

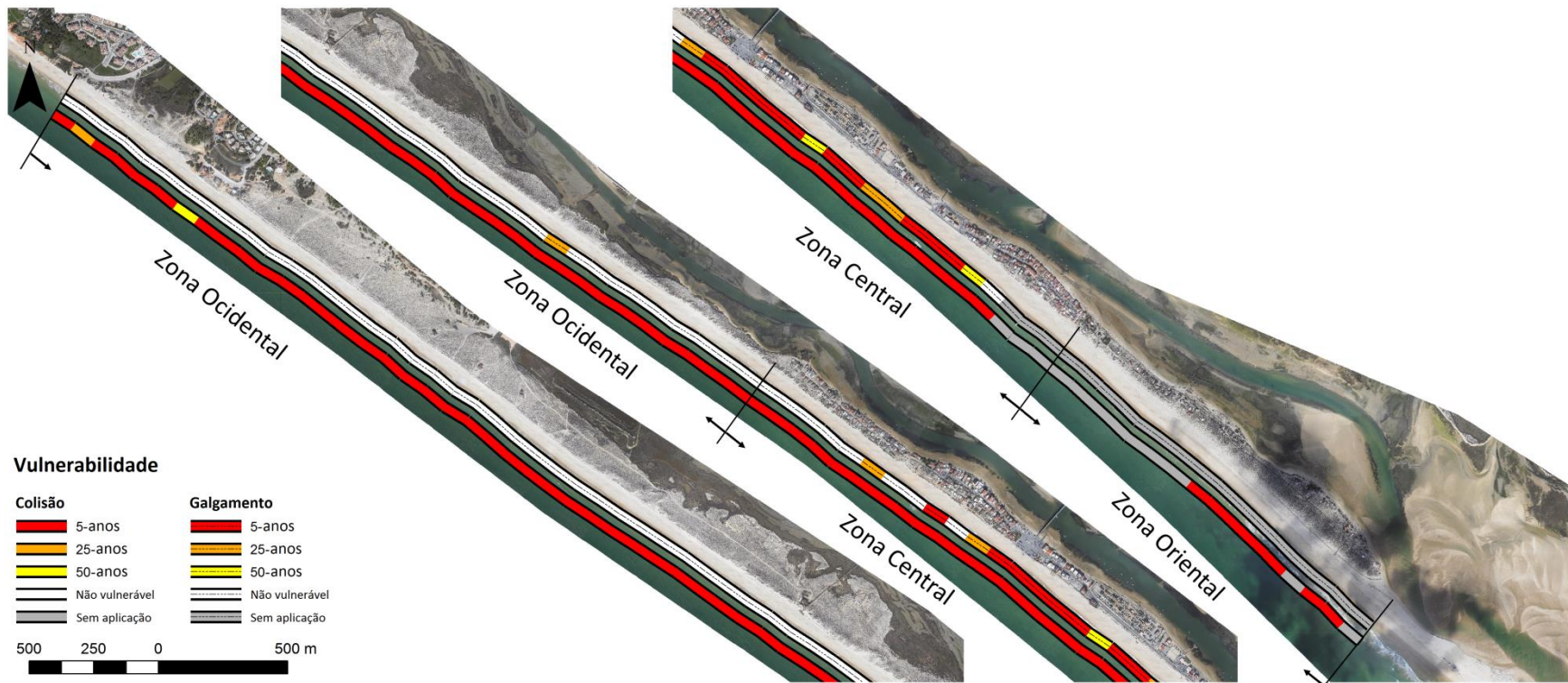


Figura 4.10 Mapa de vulnerabilidade a colisão e galgamento para períodos de retorno de 5 (vermelho), 25 (laranja) e 50 (amarelo) anos na Península do Ancão. As secções não vulneráveis são representadas pela cor branca e as secções onde a abordagem de *Sallenger* foi considerada sem aplicação são representadas pela cor cinzenta. O regime de galgamento é diferenciado do de colisão por uma linha a tracejado no interior das secções. Imagem de fundo adaptada das fotografias aéreas do LiDAR 2009.

Como é possível observar pelo mapa de vulnerabilidade a colisão e galgamento para períodos de retorno de 5, 25 e 50 anos na Ilha da Barreta (Figura 4.11) ambos os regimes de impacto de tempestade em estudo apresentaram um padrão bastante similar ao longo de toda a extensão desta ilha barreira.

A zona ocidental da I. Barreta, para praticamente toda a sua extensão, é uma zona vulnerável tanto a colisão como a galgamento para PR 5 anos. As exceções a este padrão são as últimas 3 secções no extremo nascente, no caso de colisão, e as últimas 2 secções também no extremo nascente, no caso de galgamento, nas quais foi considerado não haver aplicabilidade da abordagem de *Sallenger* (Figura 4.11).

A zona oriental da I. Barreta apresenta um padrão bastante distinto do da zona ocidental. Em praticamente toda a extensão da zona oriental a abordagem de *Sallenger* foi considerada sem aplicação tanto para o regime de colisão como para o de galgamento. Ocorreram algumas exceções a este padrão nas extremidades desta zona. Nomeadamente, relativamente ao regime de colisão, verificou-se que a terceira secção no extremo poente e as últimas 7 secções no extremo nascente são vulneráveis a colisão para PR 5 anos. Relativamente ao regime de galgamento, verificou-se que as 2 primeiras secções a poente e as 2 últimas secções a nascente apresentaram vulnerabilidade a galgamento para PR 5 anos, assim como, houve uma secção também mais a nascente com vulnerabilidade a galgamento para PR 25 anos (Figura 4.11).

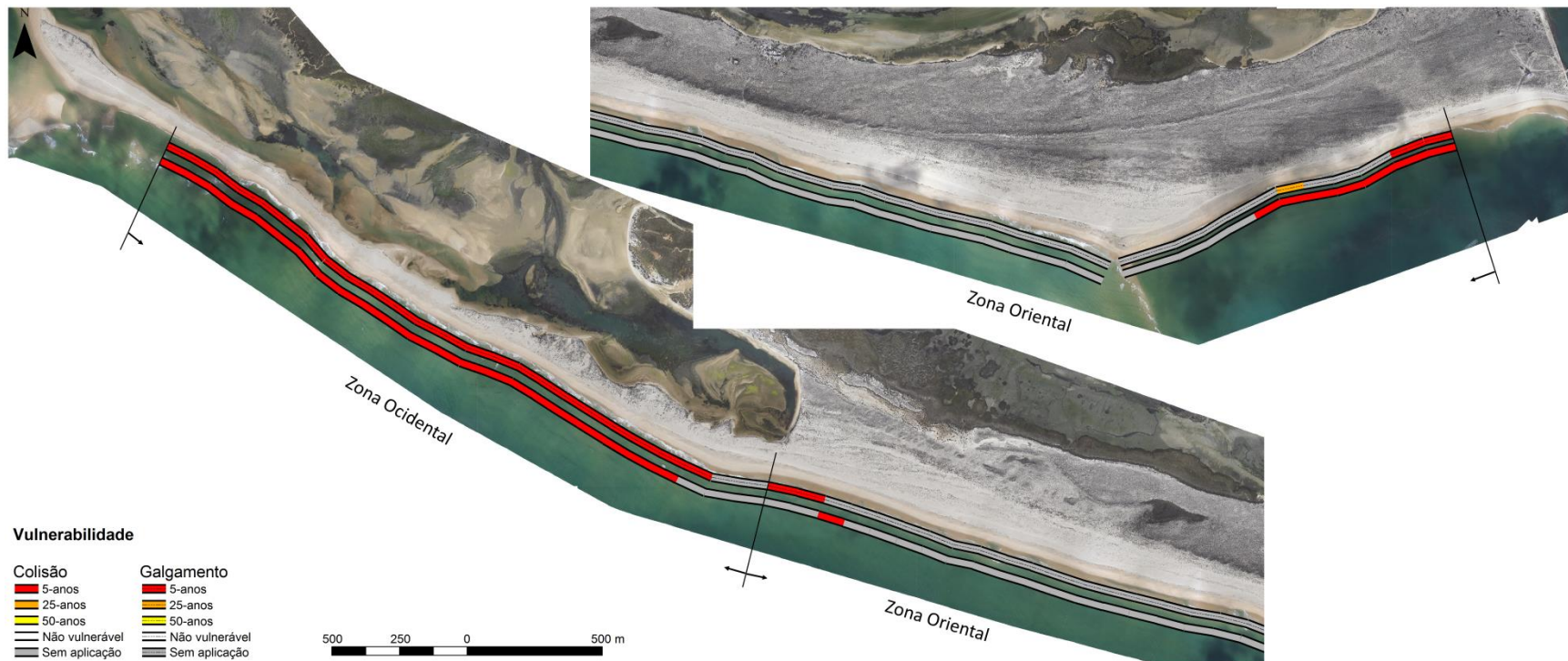


Figura 4.11 Mapa de vulnerabilidade a colisão e galgamento para períodos de retorno de 5 (vermelho), 25 (laranja) e 50 (amarelo) anos na Ilha da Barreta. As secções não vulneráveis são representadas pela cor branca e as secções onde a abordagem de *Sallenger* foi considerada sem aplicação são representadas pela cor cinzenta. O regime de galgamento é diferenciado do de colisão por uma linha a tracejado no interior das secções. Imagem de fundo adaptada das fotografias aéreas do LiDAR 2009.

Segundo o mapa de vulnerabilidade a colisão e galgamento para PR 5, 25 e 50 anos na Ilha da Culatra (Figura 4.12) praticamente para toda a extensão desta ilha barreira em estudo é vulnerável a colisão para PR 5 anos e em algumas secções para PR 25 anos. As exceções correspondem às 5 primeiras secções a poente da zona ocidental e a 8 secções localizadas sensivelmente a meio da zona oriental, nas quais foi considerado que a abordagem de *Sallenger* não tem aplicação.

O padrão do regime de galgamento obtido ao longo da área em estudo da I. Culatra apresentou bastante variabilidade, em especial na zona oriental (Figura 4.12).

A zona ocidental da I. Culatra é caracterizada alternadamente por secções onde a abordagem de *Sallenger* foi considerada sem aplicação ou por secções não vulneráveis a galgamento, prevalecendo em quantidade as secções não vulneráveis (Figura 4.12).

O extremo poente da zona oriental da I. Culatra foi considerado maioritariamente não vulnerável a galgamento apesar de ocorrerem algumas secções onde a abordagem de *Sallenger* não tem aplicação e de se verificar uma secção com vulnerabilidade a galgamento para PR 50 anos e outra para PR 25 anos. Conforme o verificado no regime de colisão, também ocorreram 8 secções localizadas sensivelmente a meio da zona oriental onde a abordagem de *Sallenger* não tem aplicação. O extremo nascente da zona oriental da I. Culatra foi considerado com vulnerabilidade a galgamento para PR 5 anos exceto 1 secção que apresentou vulnerabilidade a galgamento para PR 25 anos (Figura 4.12).

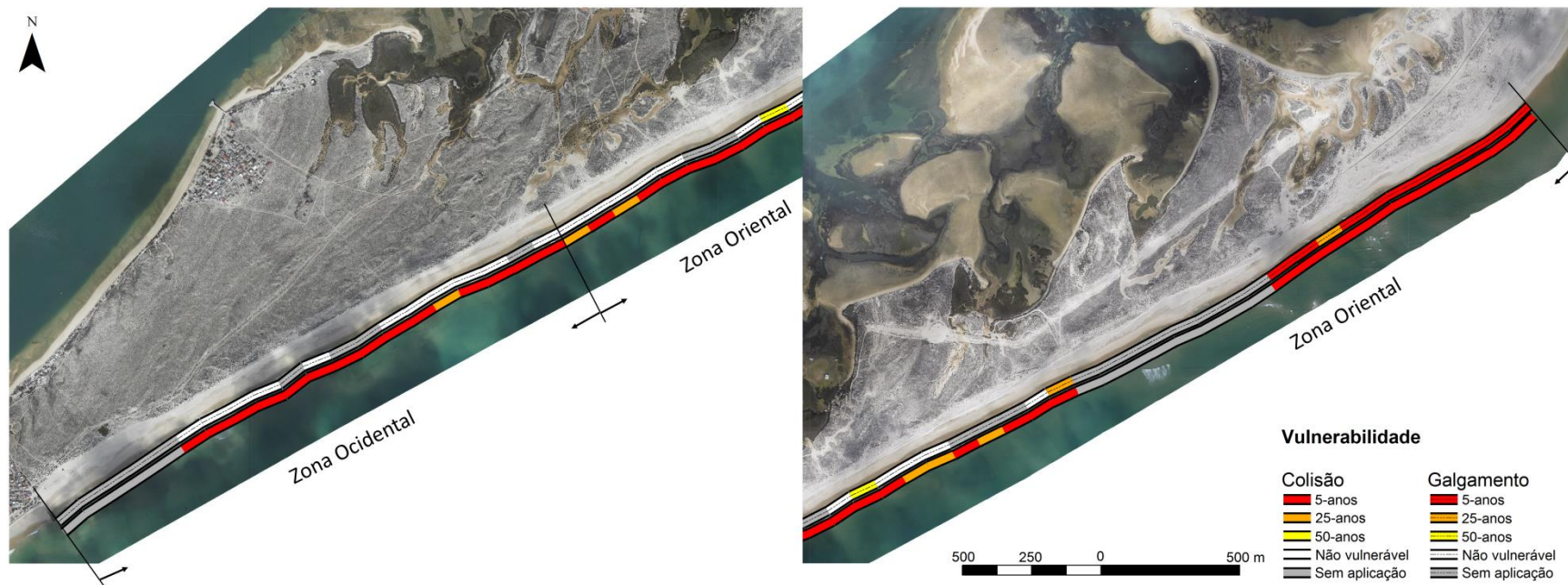


Figura 4.12 Mapa de vulnerabilidade a colisão e galgamento para períodos de retorno de 5 (vermelho), 25 (laranja) e 50 (amarelo) anos na Ilha da Culatra. As secções não vulneráveis são representadas pela cor branca e as secções onde a abordagem de *Sallenger* foi considerada sem aplicação são representadas pela cor cinzenta. O regime de galgamento é diferenciado do de colisão por uma linha a tracejado no interior das secções. Imagem de fundo adaptada das fotografias aéreas do LiDAR 2009.

Através da análise do mapa de vulnerabilidade a colisão e galgamento para períodos de retorno de 5, 25 e 50 anos na Ilha da Armona (Figura 4.13) pode verificar-se que praticamente toda a extensão desta ilha barreira em estudo é vulnerável a colisão para PR 5 anos. As exceções a este padrão do regime de colisão correspondem a 4 secções distribuídas na zona ocidental da I. Armona para as quais foi considerado que a abordagem de *Sallenger* não tem aplicação.

Semelhante à ilha barreira do flanco oriental analisada anteriormente, o padrão do regime de galgamento observado na I. Armona é bastante variável, principalmente ao longo da zona oriental (Figura 4.13).

Na zona ocidental da I. Armona são predominantes secções onde foi considerado que a abordagem de *Sallenger* não tem aplicação, mas, no entanto, também foram observadas algumas secções não vulneráveis a galgamento e outras com vulnerabilidade a galgamento para PR 5 e 25 anos (Figura 4.13).

No extremo poente, a zona oriental da I. Armona é caracterizada inicialmente por secções não vulneráveis a galgamento. Progredindo para nascente, esta zona torna-se praticamente sempre vulnerável a galgamento para 5, 25 ou 50 anos, com exceção de 2 secções não vulneráveis a galgamento no final do extremo nascente (Figura 4.13).

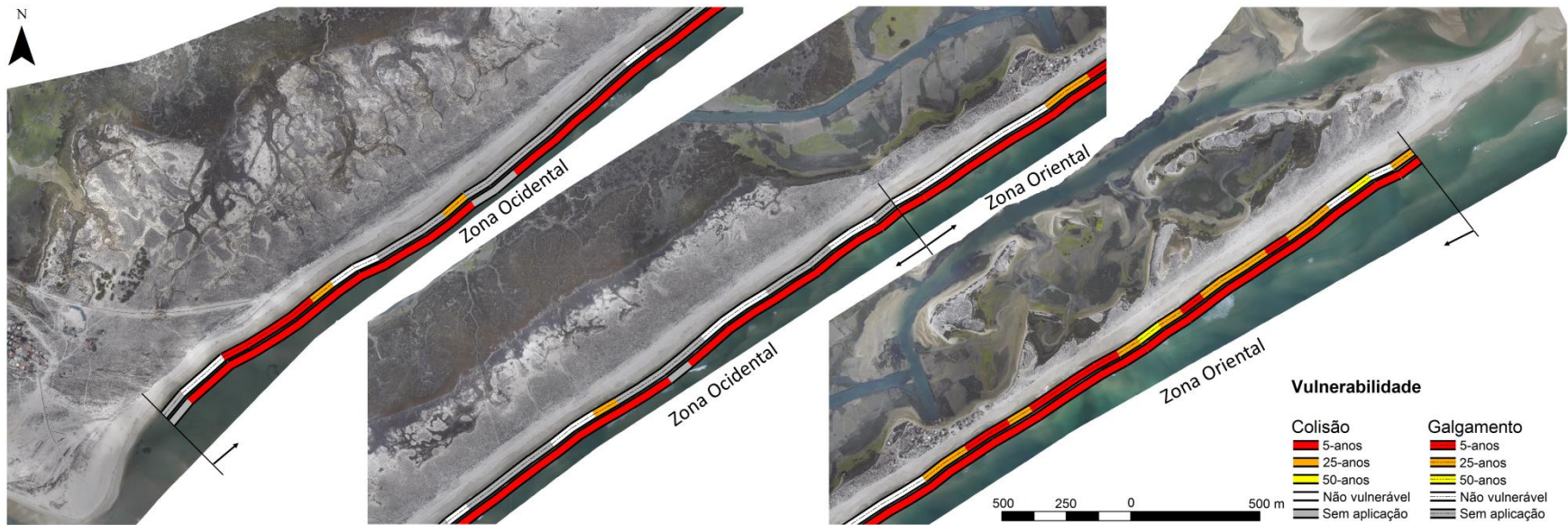


Figura 4.13 Mapa de vulnerabilidade a colisão e galgamento para períodos de retorno de 5 (vermelho), 25 (laranja) e 50 (amarelo) anos na Ilha da Armonia. As secções não vulneráveis são representadas pela cor branca e as secções onde a abordagem de *Sallenger* foi considerada sem aplicação são representadas pela cor cinzenta. O regime de galgamento é diferenciado do de colisão por uma linha a tracejado no interior das secções. Imagem de fundo adaptada das fotografias aéreas do LiDAR 2009.

## 4.4 Discussão

A variabilidade longilitoral da amplitude de atuação dos níveis de *run-up* em sistemas de praia dependente da altura e período das ondas ao largo e do pendor de face de praia (Battjes, 1974; Holman, 1986; Stockdon, 2007). A distinção em termos de atuação de esprai das ondas nos flancos ocidental e oriental foi evidente devido às diferenciações oceanográficas e morfológicas existentes entre flancos. Tendo em conta que o campo de geração das ondas de O-SO (i.e., o Oceano Atlântico) é consideravelmente superior ao das ondas de E-SE (i.e., o Golfo de Cádiz), os períodos de onda característicos das condições de O-SO são mais longos do que os de condições de E-SE (Costa *et al.*, 2001). Conferindo maior robustez à agitação de O-SO relativamente à de E-SE e, conseqüentemente, maiores amplitudes dos níveis de *run-up* atuantes no flanco ocidental relativamente aos do flanco oriental. Adicionalmente, Stockdon (2007) verificou que variações na altura significativa das ondas demonstraram ter menor influência nos níveis de  $R_{high}$  em comparação com alterações no pendor de face de praia, concluindo que o pendor é bastante mais determinante na variação longilitoral da amplitude dos níveis de *run-up* máximos. A caracterização das praias ao longo da zona de estudo é consideravelmente distinta. Nomeadamente, as áreas do flanco ocidental são caracterizadas maioritariamente por praias refletivas ou até intermédias, ao passo que, as praias do flanco oriental apresentam um carácter predominantemente intermédio, mas por vezes também dissipativo. Em sistemas de praia a suavização ou inclinação do pendor de face de praia reflete, respetivamente, numa diminuição ou num aumento nos níveis de *run-up* (Stockdon, 2007). Assim, como expectado os níveis de  $R_{high}$  obtidos para períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos por classe de pendor para condições de O-SO utilizados na determinação dos regimes de colisão e galgamento nas áreas do flanco ocidental foram consideravelmente superiores em relação aos níveis de  $R_{high}$  PR 5, 10, 25 e 50 anos por pendor para condições de E-SE utilizados para os cálculos dos regimes de colisão e galgamento nas áreas do flanco oriental.

A avaliação da precisão de aplicabilidade do modelo de regimes de impacto de tempestades desenvolvido por Sallenger (2000) demonstrou que o modelo pode ser usado na previsão dos regimes de colisão e galgamento de forma aceitável, mas com limitações, uma vez que a precisão do modelo foi precária em diversas secções da zona de estudo, principalmente nas

previsões do regime de colisão. Nomeadamente, as evidências morfológicas observadas contrapuseram as previsões obtidas segundo a abordagem de *Sallenger* em 47 % dos casos no regime de colisão (142 em 299 secções da zona de estudo) e 22 % no regime de galgamento (65 em 299 secções da zona de estudo). As irregularidades destes resultados poderão estar associadas a erros no método de extração dos parâmetros morfológicos e/ou erros nas estimativas dos níveis de  $R_{high}$  e/ou à não consideração de outros fatores influentes nas previsões dos regimes de colisão e galgamento (Stockdon, 2007; Ciavola *et al.*, 2014; Long *et al.*, 2014).

Como referido uma das razões para as diferenças registadas entre os regimes previstos e os observados poderá estar associada com o método de obtenção dos parâmetros morfológicos. Apesar de todo o processo envolvido na aquisição dos parâmetros morfológicos ter sido inteiramente dependente da ótica do observador, este processo foi executado de forma bastante minuciosa, a uma escala centimétrica, seguindo-se rigorosamente os mesmos critérios de extração para cada parâmetro morfológico em toda a zona de estudo. Assim, admite-se que os erros associados a este procedimento foram praticamente inexistentes. Por outro lado, a extração dos parâmetros morfológicos foi baseada apenas em fotografias aéreas do LiDAR de 2009. As medições dos parâmetros morfológicos obtidas através deste procedimento foram consideradas representativas das configurações morfológicas dos sistemas de praia em estudo. No entanto, importante salientar que a variação temporal destes parâmetros ocorre. Assim, em trabalhos futuros seria importante optar por análises que contabilizem esta variação e respetiva influência na previsão de consequências pré e pós tempestades.

Estimativas incorretas dos níveis de *run-up* resultam em previsões de regimes de impacto de tempestades erróneas. Atualmente é bastante comum o uso de dados modelados para complementar registos oceanográficos utilizados na determinação de níveis de *run-up*. A realização do presente estudo foi dependente da utilização de dados modelados devido à escassez e imprecisão de registos reais existentes. Assim como Almeida *et al.* (2011a) comprovaram uma boa correlação entre dados modelados e registos da boia de Faro equivalentes aos aqui utilizados, o ajuste efetuado aos dados modelados usados no presente estudo foi assertivo (*cf.* Capítulo 3), permitindo a incorporação desses mesmos dados de

forma representativa no preenchimento das lacunas dos dados da boia de Faro. Assim, a precisão empregue na criação da base de dados oceanográficos utilizada para a determinação dos níveis de espraio das ondas na zona em estudo reflete a exatidão nos níveis de  $R_{high}$  obtidos. Adicionalmente, dado à sensibilidade na variabilidade espacial da amplitude dos níveis de *run-up* relativamente a alterações no pendor de face de praia (Stockdon, 2007), a determinação de níveis de  $R_{high}$  para diferentes classes de pendor possibilitou a identificação dos níveis de  $R_{high}$  para diferentes períodos de retorno, atuantes a cada 100 m ao longo da zona de estudo, de acordo com o pendor característico de cada secção de 100 m. Assim, o procedimento utilizado no presente estudo para estimativa dos níveis de  $R_{high}$  atuantes ao longo da zona de estudo veio refinar a identificação da variabilidade espacial de  $R_{high}$ , diminuindo consideravelmente possíveis erros nas previsões dos regimes de impacto de tempestade.

As irregularidades entre as previsões e as observações também poderão estar associadas à não consideração de outros parâmetros morfológicos na determinação dos níveis de *run-up*, e.g., a existência de bancos arenosos submersos (Sedрати *et al.*, 2011; Cox *et al.*, 2013), vegetação fixa ao longo das bermas (Ciavola *et al.*, 2014) e larguras de bermas de praia e de face de duna bem desenvolvidas (Plant e Stockdon, 2012; Ciavola *et al.*, 2014). A relação entre o desenvolvimento de larguras de berma e de face de duna e a ocorrência de casos de erro (*i.e.*, seções previstas vulneráveis a colisão e/ou galgamento segundo a abordagem de Sallenger (2000) mas com evidências morfológicas contrárias) foi bastante evidente nas áreas do flanco ocidental (P. Ancão e I. Barreta) tanto para o regime de colisão como de galgamento. A maioria das seções identificadas como casos de erro na P. do Ancão e I. Barreta corresponderam a seções com larguras de berma ou berma+duna acima dos *thresholds* de colisão ou galgamento, respetivamente. Em praticamente toda a extensão das zonas oriental da P. Ancão e I. Barreta são bem visíveis evidências de acumulação sedimentar, formação de pré-dunas e fixação de vegetação que devido aos processos de infiltração, atrito e/ou tensão de cisalhamento associados, funcionam como uma barreira à ação das ondas, diminuindo a amplitude e alcance do espraio das ondas (Plant e Stockdon, 2012; Cox *et al.*, 2013; Ciavola *et al.*, 2014) e impedindo a ocorrência de colisão e galgamento nestas zonas. Por outro lado, nas áreas do flanco oriental (Ilhas da Culatra e Armona), a associação entre a ocorrência de casos de erro com a existência de larguras de

berma e de face de duna bem desenvolvidas não foi tão evidente. A maioria das seções identificadas como casos de erro nas Ilhas da Culatra e Armona não estiveram associadas a seções com larguras de berma ou berma+duna bem desenvolvidas. Sugerindo a existência de outros fatores não considerados no presente estudo (*e.g.* bancos arenosos submersos) influentes na determinação dos níveis de  $R_{high}$  e que conseqüentemente conduziram a previsões de vulnerabilidade a colisão e galgamento incompatíveis com as evidências morfológicas observadas.

Como uma fase precedente à ocorrência de galgamento, o regime de colisão está associado a um aumento do nível do mar que leva à redução da largura da zona de praia emersa e que, progressivamente, como consequência do aumento de escarpas na base das dunas, conduz a um aumento na extensão de danos na crista dunar. Em zonas propensas à ocorrência de colisão, onde o volume sedimentar ao longo das dunas embrionárias ou dunas frontais é escasso, o regime de galgamento irá potencialmente ocorrer (Davidson-Arnott, 2010). Verifica-se que praticamente toda a extensão de base de duna da zona de estudo é propensa a colisão, exceto nas seções que foram definidas com larguras de berma acima do *threshold* de colisão. O regime de galgamento ocorre para períodos de retorno de 5 anos em praticamente toda a extensão da zona ocidental da I. Barreta e do extremo nascente da zona oriental da I. Culatra. Em praticamente toda a extensão das zonas central da P. Ancão e oriental da I. Armona o regime de galgamento ocorre para períodos de retorno de 5 e 25 anos com algumas seções para períodos de retorno de 50 anos.

Os corpos dunares com as maiores elevações observadas em toda a zona de estudo ocorreram na Península do Ancão. Estas formas morfológicas conferem uma barreira de proteção natural à ação de tempestades. No entanto, praticamente toda a extensão da P. Ancão é vulnerável a colisão e a zona central é fortemente propensa à ocorrência de galgamento. Estes resultados revelam ser bastante realistas e encontram-se em concordância com os resultados obtidos em estudos prévios de Andrade (1990), Ferreira (2006), Matias (2008), Garcia (2010), Vousdoukas *et al.* (2011), Almeida (2012) e Rodrigues (2012).

O cordão dunar que se desenvolve ao longo da zona ocidental da P. Ancão chega a atingir 10 m de elevação acima do NMM e, em média, são registados bases e topos de duna com 5 e 8 m de elevação acima do NMM, respetivamente. Contudo, os pendores de praia refletiva

característicos da zona ocidental da P. Ancão impedem a dissipação de energia das ondas por processos de fricção ao longo da face de praia provocando um aumento dos níveis de *run-up* (Stockdon *et al.* 2006) e, conseqüentemente, conferindo a esta zona a atuação de níveis de  $R_{high}$  elevados (*e.g.* média  $R_{high}$  PR 5 anos = 6.12 m). Sugerindo que toda esta zona é potencialmente sujeita ao impacto das tempestades apesar das elevações de base de duna acentuadas observadas. Nomeadamente, segundo Ferreira *et al.* (2006) a linha de costa da zona ocidental da P. Ancão recua anualmente 0.8 m. Adicionalmente, a praia ao longo desta zona é estreita, onde nomeadamente foram registadas em média as menores larguras de berma da P. Ancão (média  $B_{larg}$  = 17 m). A diminuição das velocidades de *run-up* por processos de infiltração ou tensão de cisalhamento é reduzida, devido ao fraco desenvolvimento das larguras de berma de praia. Assim, a ação das tempestades atinge facilmente a base de duna tornando esta zona vulnerável a colisão em toda a sua extensão, como é possível constatar pela presença de escarpas na base de duna.

Por outro lado, apesar da zona ocidental da P. Ancão ser caracterizada por uma praia estreita, com perfil refletivo e dominada por níveis de  $R_{high}$  elevados, esta não apresenta vulnerabilidade a galgamento em toda a sua extensão, exceto na seção 47 onde se verifica vulnerabilidade a galgamento para PR 25 anos devido a um decréscimo de 2 m na elevação da crista dunar relativamente às seções adjacentes (de cerca de 8 para 6 m acima do NMM). Esta seção corresponde à localização de uma barra efémera, atualmente colmatada, mas bem demarcada na topografia, originada pelo ciclone de 1941 (Andrade, 1990). A intervenção humana ao longo do cordão dunar é insignificante ou mesmo inexistente e não causa quaisquer bloqueios nos processos de reestruturação das dunas frontais. Inclusive são evidentes morfologias de acreção, como o desenvolvimento de pré-dunas, resultantes de realimentações a montante que ocorrem desde 1998 (Oliveira *et al.*, 2008). É de facto que são evidentes inúmeros cortes eólicos ao longo do cordão dunar desta zona, derivados do pisoteio desorganizado, que provocam o rebaixamento da crista dunar. No entanto, esta diminuição nunca ocorre para elevações inferiores aos níveis de  $R_{high}$  atuantes nesta zona ao ponto de permitir a ocorrência de galgamento.

A suscetibilidade da zona central da P. Ancão ao impacto de tempestades é evidente. Voudoukas (2012) afirma mesmo que a morfologia observada na Praia de Faro é forçada a

adaptar-se às condições específicas características das ondas. De acordo com as previsões obtidas toda a sua extensão é propensa à ocorrência de escarpamento da base de duna como consequência do impacto de tempestades com PR 5 anos. Esta elevada vulnerabilidade a colisão em toda a zona central é consequência dos perfis de praia refletiva que refletem em níveis de Rhigh elevados (*e.g.* média Rhigh PR 5 anos = 6.12 m) sempre superiores às elevações de base de duna observadas, em média 5 m acima do NMM, conjugado com o facto de as larguras de berma nesta zona serem pouco desenvolvidas. Como constatado por Voudoukas (2012) enquanto a erosão da face superior da Praia de Faro está relacionada a condições energéticas menos frequentes, a face inferior da praia mostra responder muito rapidamente às variações no regime das ondas mais frequentes e dominantes de SO. O mesmo autor também afirma que o comportamento dinâmico da Praia de Faro é resultante dos pendores íngremes observados, característicos de praias de caráter intermediário a refletivo, derivados da sua exposição a clima de agitação de ondas moderado a alto e de condições erosivas prolongadas.

As praias mais suscetíveis e vulneráveis a condições de intempéries são as que sofrem as consequências de intervenções humanas (diretas ou indiretas), resultantes de má gestão e mau planeamento de ocupação (Ferreira *et al.*, 1997). A zona central da P. Ancão compreende a área costeira com maior densidade populacional de toda a zona em estudo. Na maioria da sua extensão o cordão dunar frontal existente é sobreposto por edifícios, completamente destruído pelo desenvolvimento urbano, protegido por enrocamentos, estabilizado artificialmente por quebra-mares ou fixo e reconstruído por estacarias. A maioria destas intervenções antrópicas tem repercussões negativas no sistema de praia envolvente. Como por exemplo, a construção de infraestruturas fixas ao longo do cordão dunar impossibilita o desenvolvimento de novas dunas embrionárias ou a recuperação de dunas frontais (Davidson-Arnott, 2010) tornando estas zonas mais suscetíveis à ocorrência de galgamento. Inclusive, o rebaixamento dunar causado por intervenções humanas pode conduzir à ocorrência de galgamento nessas zonas mesmo sem condições de tempestades, como já foi observado na zona central da P. Ancão durante marés vivas equinociais (Matias *et al.*, 2008). Segundo estudos prévios a relação causa-efeito entre a ocorrência de intervenções humanas e zonas vulneráveis a galgamento é óbvia nesta zona (Andrade, 1990; Ferreira *et al.*, 2006; Matias *et al.*, 2008; Garcia, 2010; Almeida *et al.* 2012, Rodrigues *et al.*, 2012). Justificando

a vulnerabilidade a galgamento obtida em praticamente toda a extensão da zona central da P. Ancão para tempestades com retorno de 5, 25 e 50 anos. Para além do pendor de praia refletiva, níveis de  $R_{high}$  elevados e larguras de berma pouco desenvolvidas a suscetibilidade a galgamento nesta zona é fundamentada principalmente como o resultado derivado da destruição quase total do cordão dunar por ocupação antrópica.

Apenas o extremo poente da zona central da P. Ancão não é vulnerável a galgamento devido às cotas elevadas que a crista dunar aqui apresenta. No entanto, ocorreram três seções onde as previsões a galgamento foram sobrestimadas. Nomeadamente, na seção 62, o registo de uma diminuição de elevação da crista dunar relativamente às seções adjacentes refletiu na previsão a galgamento para tempestades com retorno de 25 anos nesta seção. Nas seções 65 e 67, o aumento da inclinação do pendor de face de praia refletiu no aumento dos níveis de  $R_{high}$  atuantes nestas seções levando às previsões de galgamento para PR 5 e 25 anos.

Matias *et al.* (2008) e Garcia *et al.* (2009) assumem que a evolução do sistema de ilhas-barreira da Ria Formosa tem tendido para um decréscimo dos processos de galgamento desde 1976, com base na análise de *washovers* (formas morfológicas que se revelam no sedimento após ocorrência de galgamento) como método de identificação de zonas suscetíveis a galgamento. Apesar da assertividade existente nesse género de análise em sistemas de praia naturais, como exemplificado pelos mesmos autores na zona de estudo, é necessário salientar a sua limitação de aplicabilidade em zonas antrópicas. Os *washovers* resultantes de galgamentos em zonas urbanizadas são rapidamente destruídos e removidos artificialmente por ação humana, de forma a desobstruir as superfícies e infraestruturas urbanas, tornando inviável a sua interpretação. Assim, a não contabilização desses *washovers* pode levar à subestimação de galgamento em zonas urbanizadas como é o caso da zona central na P. Ancão. Adicionalmente, no estudo desenvolvido por Garcia *et al.* (2009) não foi assumido a distinção entre zonas ocidental, central e oriental na P. Ancão, que são bem distintas morfologicamente e em termos de evolução de linha de costa dominante (erosão, estabilidade dinâmica e acreção; *cf.* Ferreira *et al.*, 2006) tornando a classificação de vulnerabilidade a galgamento nesta barreira simplista e homogénea, opostamente ao obtido no presente trabalho.

Desde o extremo nascente da zona central para Este ao longo da zona oriental é possível observar um aumento de largura de bermas e de face de duna, onde alcançam, em média, larguras de 33 e 35 m, respetivamente. As larguras de berma e duna tendem a reduzir o limite de alcance dos níveis de *run-up* (Horn e Ling, 2006; Ciavola *et al.*, 2014) conseqüentemente, mesmo que seja previsto que os níveis de *R<sub>high</sub>* excedam as elevações de duna registadas não implica que na realidade seja observado que os níveis de espraio máximos atinjam ou ultrapassem a duna frontal e daí ocorra colisão ou galgamento. Assim, uma vez que as seções do extremo nascente da zona central apresentaram larguras de berma e face de duna superiores aos *thresholds* de colisão e galgamento definidos neste trabalho, foi considerado que a abordagem de *Sallenger* não tem aplicação para ambos os regimes de colisão e galgamento. O mesmo se aplica em toda a extensão da zona oriental da P. Ancão, relativamente ao regime de galgamento, e na metade poente da mesma zona, para o regime de colisão.

Após a abertura artificial de uma nova Barra do Ancão em 1997, despertaram ao longo da zona oriental da Península do Ancão processos de acreção derivados do delta de vazante bem desenvolvido que funcionou como uma armadilha de sedimento (Ferreira *et al.*, 2006). Atualmente são claras as evidências de acumulação e desenvolvimento sedimentar resultantes nesta zona, tais como, o desenvolvimento de bermas largas, formação de pré-dunas vegetadas e reconstrução dunar. Também como consequência, o cordão dunar frontal ao longo da zona oriental da P. Ancão desenvolveu-se numa localização mais próxima ao mar e, em média, atinge elevações significativas de base e topo de duna de 5 e 7 m acima do NMM, respetivamente. Assim, apenas se verificou vulnerabilidade a colisão para tempestades com retorno de 5 anos na metade nascente da zona oriental da P. Ancão devido à diminuição das elevações de base de duna verificadas nessa zona.

A Ria Formosa é um sistema de ilhas-barreira com múltiplas barras de maré no qual 45 % da extensão total das barreiras está localizada dentro da área de perigo das barras (Vila-Concejo *et al.*, 2006). Apesar de no presente estudo não se ter contabilizado para análise as extremidades das barreiras, como mencionado e justificado no capítulo anterior, toda a extensão da zona ocidental da I. Barreta analisada encontra-se dentro da área de perigo da Barra do Ancão definida por Vila-Concejo *et al.* (2006), sendo uma zona marcada

distintivamente pela migração desta barra (Matias *et al.*, 2008). Conforme o previsto no presente trabalho a zona ocidental da I. Barreta está sujeita tanto a colisão como a galgamento para tempestades com maior frequência de ocorrência (PR 5 anos). Para além das características de praia refletiva, tais como pendores máximos de 0.16 que induzem a níveis de Rhigh elevados atuantes nesta zona, a influência do dinamismo da Barra do Ancão na morfologia da própria barreira, foram determinantes nos resultados obtidos na zona ocidental da I. Barreta. A retenção de sedimento no delta de vazante da Barra do Ancão promove carência no fornecimento sedimentar a jusante (Vila-Concejo *et al.*, 2003), ou seja, na zona ocidental da I. Barreta. Facto que contribui para o fraco desenvolvimento de bermas (13 m de largura em média) e faces de duna (0.6 m de largura em média) e elevações reduzidas de bases e topos de duna (4 m acima do NMM em média) nesta zona, e, conseqüentemente favorece a suscetibilidade desta zona aos regimes de colisão e galgamento. Segundo Matias *et al.* (2009) a principal causa de ocorrência de galgamento na zona ocidental da I. Barreta é devido ao déficit de sedimento derivado da retenção de areias nas morfologias associadas à Barra do Ancão. Garcia *et al.* (2010) adianta ainda que caso se verifique que a privação de sedimento induzida pela Barra do Ancão continue, a zona ocidental da I. Barreta continuará ou mesmo poderá aumentar a sua vulnerável a galgamento.

O comportamento morfológico observado na zona oriental da I. Barreta é oposto ao da zona ocidental, devido às conseqüências físicas que advieram da abertura e estabilização da Barra de Faro-Olhão (*cf.* Pacheco *et al.*, 2008). Esta zona é classificada como uma área relativamente estável onde se verificou um avanço da linha de costa em direção ao mar de 220 m em 12 anos (Bettencourt, 1985). A interrupção do transporte sedimentar pelos molhes de fixação da Barra de Faro-Olhão repercutiu em processos de acumulação sedimentar ao longo da zona oriental da I. Barreta, contribuindo para o desenvolvimento de corpos dunares extensos e amplos (largura média de face de duna de 42 m), e de bermas largas (média 60 m) com formação de pré-dunas. No entanto, devido às baixas elevações de base e topo de duna e aos níveis de Rhigh elevados atuantes, esta zona foi prevista como vulnerável a colisão e galgamento para tempestades como PR 5 anos. Contudo, é do conhecimento que as velocidades de *run-up* sofrem redução ao longo das bermas e faces de duna extensas devido aos processos de infiltração e tensão de cisalhamento, impedindo que a ação das tempestades atinja as dunas e conseqüentemente que não ocorra colisão e galgamento. Assim, a não

observação de indícios de erosão e galgamento em praticamente toda a extensão da zona oriental da I. Barreta apoia o facto de que o desenvolvimento de largas de berma e face de duna extensas contribui para a dissipação do espraio das ondas e consequentemente influencia a determinação do impacto de tempestades a colisão e galgamento. Justificando assim a adaptação do mapa de vulnerabilidade a colisão e galgamento através da incorporação dos *thresholds* de colisão e galgamento definidos. No qual praticamente toda a extensão da zona oriental da I. Barreta foi identificada como sem aplicação da abordagem de *Sallenger*. A notável dissemelhança de vulnerabilidade à ocorrência de colisão e galgamento entre as zonas ocidental e oriental da I. Barreta vai de acordo com estudos prévios realizados na Ria Formosa (Andrade, 1990; Garcia *et al.*, 2008, 2010) ou em particular na I. Barreta (Matias *et al.*, 2008, 2014).

Inversamente à tendência de acumulação sedimentar e avanço da linha de costa observados na barreira a montante da Barra de Faro-Olhão, a jusante a Ilha da Culatra é exposta a processos erosivos devido ao défice sedimentar derivado da interrupção da deriva longilitoral pela construção dos molhes de fixação da mesma barra de maré (Garcia *et al.*, 2002; Matias *et al.*, 2008). De facto, como se pôde constatar pelos resultados obtidos neste trabalho foi previsto vulnerabilidade a colisão para toda a extensão desta ilha. Apesar de se ter registado uma diminuição dos níveis de atuação de *run-up* nas ilhas do flanco oriental relativamente aos das ilhas do flanco ocidental, as previsões do regime de colisão na I. Culatra resultam das baixas elevações de base de duna (em média cerca de 3 m) registadas em toda esta barreira. No entanto, de acordo com as observações morfológicas não existem quaisquer evidências que apoiem a ocorrência de colisão para a maioria das secções da zona oriental e em algumas secções da zona ocidental. Nomeadamente são claras as evidências de acumulação e estabilidade sedimentar, pela fixação de espécies de vegetação pioneira, observada ao longo das bermas largas (em média 25 m) existentes na zona oriental. Inclusive, Garcia *et al.* (2010) constatou que a implementação de estacarias em combinação com a existência de bermas bem desenvolvidas favoreceu fortemente a acumulação sedimentar e consequentemente a recuperação dunar ao longo do extremo poente da zona oriental da I. Culatra. Assim como, para Este, no extremo nascente da zona oriental é evidente acreção, resultante do crescimento da própria ilha barreira em consequência do aumento da extensão dos molhes da Barra de Faro-Olhão (Garcia *et al.*, 2010).

A influência do desenvolvimento acentuado de larguras de berma nas diferenças obtidas entre as previsões de vulnerabilidade a colisão e as evidências morfológicas observadas foi evidente em diversas secções da I. Culatra. Contudo, ainda foram significativas as secções para as quais não foi possível assumir esta influência. Apontando para a existência de outros fatores influentes na determinação do regime de colisão segundo a abordagem de *Sallenger* nesta ilha barreira. As previsões do regime de galgamento na I. Culatra enquadraram-se razoavelmente às observações morfológicas. Praticamente toda a extensão da I. Culatra não é prevista como vulnerável a galgamento como é possível comprovar pelas evidências morfológicas. Nomeadamente, a fixação de vegetação ao longo das bermas e faces de duna bem desenvolvidas favoreceram visivelmente a recuperação dunar ao longo desta ilha. No entanto, de acordo com as previsões obtidas segundo a abordagem de *Sallenger* o extremo nascente da zona oriental da I. Culatra foi considerado vulnerável a galgamento, apesar de existirem evidências morfológicas indicativas de ocorrência de galgamento em somente duas secções. Assim, a relação entre o desenvolvimento acentuado de larguras de berma + face de duna e a sua influência na determinação do regime de galgamento não foi tão evidente para o caso da I. Culatra. Inclusive, foram poucas as secções onde o *threshold* de galgamento teve aplicabilidade na justificação de ocorrências onde as previsões não corresponderam às evidências morfológicas observadas nesta ilha barreira. Para além de que, segundo Matias *et al.* (2008) o recuo da linha de costa com ocorrência de galgamento na I. Culatra é uma resposta do sistema de praia à intervenção antrópica de extensão dos molhes da Barra de Faro-Olhão. Logo, a ocorrência de galgamento nesta ilha é uma consequência de ações antrópicas e terá tendência para ocorrer em locais mais suscetíveis, tais como, zonas da barreira com baixas elevações de topo de duna e larguras de berma e face de duna pouco desenvolvidas.

O padrão das previsões de vulnerabilidade a colisão e galgamento na Ilha da Armona foi similar ao da I. Culatra. Nomeadamente, toda a extensão desta barreira foi prevista como vulnerável a colisão e as zonas suscetíveis a serem galgadas foram localizadas maioritariamente nas extremidades da ilha. Igualmente ao verificado na I. Culatra, a influência do desenvolvimento acentuado de larguras de berma e face de duna nas previsões obtidas não foi tão evidente como nas ilhas do flanco ocidental. Mais concretamente, praticamente todas as secções da I. Armona corresponderam a secções com larguras de berma

inferiores ao *threshold* de colisão. Assim, poucos foram os casos em que o *threshold* de colisão justificou as diferenças verificadas entre as previsões obtidas segundo a abordagem de *Sallenger* e as observações morfológicas. A previsibilidade de galgamento obtida para a I. Armona foi consideravelmente satisfatória relativamente ao observado morfológicamente. Contudo, a utilização do *threshold* de galgamento como justificação para os poucos casos com previsões erróneas, não teve aplicabilidade, visto que, todas as secções definidas dentro do *threshold* de galgamento corresponderam a secções onde as previsões coincidiram com as observações morfológicas. Sendo assim, é evidente que existem outros fatores, para além de larguras de berma e face de duna bem desenvolvidas, com influência na previsão dos regimes de colisão e galgamento segundo a abordagem de *Sallenger* para a I. Armona.

Todos os processos relacionados com as barras de maré correspondem a mecanismos determinantes na formação de *washover*, conectados diretamente à ocorrência de galgamentos (Matias *et al.* 2008). Tendencialmente, zonas a jusante das barras de maré estarão sempre mais propensas à privação de sedimento, com conseqüente recuo da linha de costa, sendo assim, zonas potencialmente mais vulneráveis a erosão e, conseqüentemente, em algumas situações a galgamento. Exemplo são os casos, das zonas ocidentais das ilhas barreira em estudo, à exceção da zona ocidental da I. Armona. Esta zona foge deste cenário, visto ser uma zona relativamente estável sem alterações significativas a nível de comportamento morfológico, devido à dissipação da agitação marítima favorecida pelo delta de vazante da Barra da Armona, para além de também assegurar um fornecimento sedimentar complementar à zona ocidental da I. Armona (Andrade, 1990). As secções para as quais foi tanto previsto como observado morfológicamente a ocorrência de galgamento, coincidem maioritariamente a zonas onde foi registado uma diminuição considerável das elevações de base e topo de duna. Estas diminuições de elevação estão relacionadas à existência de passagens pedonais ou coincidem com zonas antropicamente utilizadas em especial durante a época balnear (e.g. praia da Fuseta). Como já foi observado por Matias *et al.* (2008) o rebaixamento dunar causado por intervenções humanas na zona oriental da I. Armona, pode conduzir à ocorrência de galgamento nessa zona, durante marés vivas equinociais mesmo sem se verificar condições de tempestades. E por outro lado, como comprovado por Garcia *et al.* (2010) apesar de não serem frequentes *washovers* ativos na zona oriental da I. Armona,

esta zona é altamente vulnerável a galgamento devido às larguras de berma e de face de duna bastante reduzidas aí características, como comprovado também no presente trabalho.

No contexto de quantificação do regime de galgamento nas Ilhas da Culatra e Armona, os resultados obtidos no presente trabalho vão de acordo com a classificação de vulnerabilidade a galgamento determinado por Garcia *et al.* (2010) e com a suscetibilidade a galgamento definida por Andrade *et al.* (1990).

## 4.5 Conclusão

A configuração geomorfológica do sistema de ilhas e penínsulas barreira da Ria Formosa, onde se enquadra a zona em estudo, contribui por si só para comportamentos diferentes em termos de resposta dos flancos ocidental e oriental devido à diferenciação de exposição à atuação da agitação marítima. Os processos de refração e difração das ondas, derivados da forma cúspide que este sistema apresenta, assumem um papel importante na propagação da agitação incidente nas áreas consideradas em estudo. A individualização na análise utilizada neste trabalho entre condições de agitação de Oeste-Sudoeste (O-SO) e de Este-Sudeste (E-SE) para aplicação específica nos cálculos de níveis de *run-up* máximos ( $R_{high}$ ) no flanco ocidental (Península do Ancão e Ilha da Barreta) e no flanco oriental (Ilhas da Culatra e Armona), respetivamente, foi essencial para minimizar possíveis influências destes processos nos resultados e, por outro lado, para evidenciar as consequências de tempestades resultantes de agitação marítima com maior influência em cada respetivo flanco.

As consequências resultantes de impactos de tempestades não são exclusivamente dependentes de um parâmetro apenas, mas, no entanto, os períodos de retorno de eventos de tempestade têm sido usualmente determinados tendo apenas em consideração a altura das ondas (Ferreira, 2006). Comumente as previsões de colisão e galgamento são atingidas através dos valores dos níveis de  $R_{high}$  estimados com base em parâmetros característicos de uma determinada tempestade com determinado período de retorno. Esses parâmetros são obtidos pela sua associação a um único parâmetro de onda, ou seja, ao valor máximo da altura das ondas registado em cada tempestade. O uso de abordagens que englobem na sua metodologia maior quantidade de parâmetros é imprescindível. Assim, o presente trabalho aparece como hipótese de abordagem distinta. Nomeadamente, ao invés, de determinar as

consequências associadas à altura da onda característica de uma tempestade com determinado período de retorno, foram determinadas as consequências associadas a níveis de  $R_{high}$  com períodos de retorno de 5, 25 e 50 anos para 6 diferentes classes de pendor de face de praia tanto para condições de O-SO como de E-SE.

A influência do desenvolvimento acentuado de larguras de berma e de face de duna nas previsões de colisão e galgamento foi bem mais claro nas ilhas do flanco ocidental (Península do Ancão e Ilha da Barreta), com maior evidência na Ilha da Barreta, do que nas ilhas do flanco oriental (Ilhas da Culatra e Armona). Nas ilhas do flanco ocidental a utilização dos *thresholds* de colisão e de galgamento, para definição de secções onde a aplicabilidade da abordagem de *Sallenger* para previsão dos regimes de colisão e galgamento tem limitações, foi marcadamente proveitosa. Nas ilhas do flanco oriental as previsões de galgamento coincidiram bastante com as observações morfológicas, contrariamente ao verificado com as previsões de colisão. Por outro lado, a utilidade dos *thresholds* de colisão e de galgamento como justificação dos casos de erro obtidos nas ilhas do flanco oriental não foi satisfatória. Uma vez que as secções enquadradas dentro dos *thresholds* corresponderam na maioria a secções de casos de sucesso, ou seja, onde as previsões estavam de acordo com as observações morfológicas. Assim, para as ilhas do flanco oriental é evidente que existem outros fatores influentes nas previsões dos regimes de colisão e galgamento para além do desenvolvimento de larguras de berma e de face de duna.

Cerca de 45% do comprimento total do sistema de ilhas e penínsulas barreira da Ria Formosa corresponde a áreas de perigo associado às barras de maré (Vila-Concejo *et al.* 2006b). O pico de ocorrência de galgamentos está relacionado com a existência de margens das barras de maré pouco elevadas e imaturas formadas como resultado de acreção a montante e recessão de sedimento a jusante das barras (Matias *et al.*, 2008). Apesar de não se ter contabilizado para análise no presente trabalho parte das extremidades das barreiras em estudo, devido à influência dos deltas de vazante das Barras do Ancão, da Armona e da Fuseta e dos molhes da Barra de Faro-Olhão na propagação das ondas, a maioria das ocorrências de galgamento foram previstas em zonas dentro das áreas de perigo associado às barras de maré da Ria Formosa, definidas por Vila-Concejo *et al.* (2006b), e coincidiram a secções com larguras de berma + face de duna pouco desenvolvidas. À exceção da Península do Ancão

onde a ocorrência de galgamentos esteve associada à zona central densamente urbanizada, mas também caracterizada por larguras de berma pouco desenvolvidas e larguras de face de duna bastante reduzidas e mesmo em alguns casos inexistentes.

A aplicabilidade do método utilizado neste trabalho para a determinação de vulnerabilidade a colisão e galgamento nos sistemas barreira em estudo foi bastante aceitável. Pelo facto de terem sido notáveis as correspondências entre as seções vulneráveis a colisão e a galgamento previstas no presente estudo e as zonas efetivamente conhecidas como vulneráveis na zona em estudo, onde são recorrentes episódios de erosão e galgamento e dos quais existem registos das suas ocorrências. Porém, é de ter em conta que as previsões foram obtidas com base em dados topográficos extraídos de Modelos Digitais de Terreno dos levantamentos LiDAR 2009, e dado o forte dinamismo característico dos sistemas de praias, ocorrem variações rápidas e distintas nas morfologias de praia e duna ao longo do tempo, quer em função do equilíbrio do próprio sistema, quer por condições de tempestade ou mesmo por fatores antrópicos. Assim, a incorporação e atualização de dados topográficos de forma periódica pode melhorar a precisão das previsões.

A importância do volume de areia existente na berma e na duna para perceber o impacto de tempestades no recuo de dunas costeiras foi considerado como o fator com maior peso a ter em conta por Garzon *et al.* (2021), o que veio confirmar o defendido neste trabalho, relativamente à importância de inclusão de larguras de berma e de face de duna nas previsões de colisão e galgamento. Assumindo a notável influência das larguras de berma e de face de duna nas previsões dos regimes de colisão e galgamento foi possível apresentar uma adaptação à abordagem de *Sallenger* através da incorporação dos *thresholds* de colisão e galgamento. Contudo, a impossibilidade de justificação de algumas previsões erróneas obtidas no presente estudo sugere a atenção para a consideração em estudos futuros de outros fatores influentes nas previsões dos regimes de colisão e galgamento. Neste seguimento, será importante procurar definir uma abordagem que identifique padrões de resposta através de relações observadas entre variações quantitativas no perfil de praia (*e.g.* do recuo máximo de praia) com variações de elevação específicas e determinantes no perfil de praia (*e.g.* base e topo de duna), assim como, a incorporação de outros parâmetros (*e.g.* batimetria, barras submersas e vegetação ao longo do perfil de praia) na determinação dos níveis máximos de

atuação do mar. Apesar de Garzon *et al.* (2021) terem concluído que o efeito da vegetação na mitigação de erosão possa ser reduzido comparativamente ao volume de areia existente nas larguras de berma e de duna, foi constatado a sua importância na redução de níveis de *run-up* por Ciavola *et al.*, (2014) e por outro lado, a presença de vegetação promove a estabilização, assim como, o desenvolvimento vertical dos corpos dunares, que constituem formas morfológicas que conferem uma barreira de proteção natural à ação de tempestades. Assim, a sua consideração em trabalhos futuros deve ser tida em conta.

# 5. ÍNDICES COSTEIROS

## 5.1 Introdução

As zonas costeiras desenvolvem-se na interface entre três grandes grupos de sistemas naturais existentes à face do planeta terra, que são a atmosfera, o oceano e a superfície terrestre. Todos os processos que atuam nestes três grandes grupos, são responsáveis pela escultura das zonas costeiras, e a interação entre estes processos, denomina o forte dinamismo existente nestas zonas (Davidson-Arnott, 2010). Consequência do seu caráter extremamente dinâmico e acoplado à sua complexidade geomorfológica a resposta das zonas costeiras a eventos climáticos extremos é amplamente diversificada e com amplitudes variadas (Balica *et al.*, 2012). É do conhecimento comum que as áreas urbanas adjacentes à linha de costa estão associadas a grandes e crescentes concentrações de população humana, estabelecimentos e atividades socioeconómicas (Balica *et al.*, 2012). Considerando o facto de que 21 % da população mundial vive em zonas costeiras (du Gommès *et al.*, 1997; Brooks *et al.*, 2006), é expectável que devido às alterações climáticas as comunidades costeiras em todo o mundo sejam cada vez mais afetadas por perigos naturais (Balica *et al.*, 2012; Vousdoukas *et al.*, 2017). Como referido em Ferreira *et al.* (2016b), eventos recentes e históricos de baixa frequência e alto impacto, como Xynthia (França em 2010), Hercules (costa oeste da Europa em 2014) ou a tempestade de 1953 no Mar do Norte (Holanda, Bélgica e Reino Unido), demonstraram a exposição das zonas costeiras da Europa aos riscos induzidos por cheias e erosão. Com isto é evidente a necessidade emergente de avaliação de risco costeiro. Contudo, apesar que existirem certas zonas costeiras onde o risco regional é claramente reconhecido, avaliado e gerenciado, outras pecam nesse sentido, o que resulta na falta de ferramentas e dados para se realizar uma avaliação de risco costeiro (Ferreira *et al.*, 2016b).

O conhecimento da interação entre todos os processos que interferem no desenvolvimento do litoral e a identificação de zonas costeiras potencialmente mais suscetíveis a perigos são imprescindíveis na tomada de medidas de gestão costeira de forma adequada e equilibrada, consoante a ameaça e, de acordo com, cada meio ambiente envolvente, de forma a garantir a segurança de comunidades costeiras e a preservação de habitats e de espécies autóctones.

A gestão integrada e coordenada das zonas costeiras é essencial para o seu desenvolvimento sustentável e de extrema importância para o aproveitamento das suas potencialidades e mitigação dos problemas ocorrentes nestas zonas. Com base nesta fundamentação lavrou-se o compromisso assumido em 1992, no âmbito da Conferência do Rio, pelos países com zonas costeiras, incluindo os da União Europeia, de promover o desenvolvimento sustentável e a gestão integrada das zonas costeiras e marinhas (Instituto da Água, 2009).

Segundo as recomendações do Conselho da União Europeia e do Parlamento Europeu relativamente à implementação de estratégias de Gestão Integrada de Zonas Costeiras (GIZC) na Europa (2002) era explícito a urgência e necessidade de implementar uma GIZC europeia. No projeto [EUROSION](#) foram exaustivamente estudados e descritos o alcance e a urgência deste problema (Jiménez, 2010). No entanto, a sua aplicabilidade nunca foi validada. Para colmatar esta lacuna e adaptar tal estratégia à realidade das costas europeias, foi lançado o projeto de investigação [CONSCIENCE](#) (lançado em 2007) da União Europeia, que foi desenvolvido no intuito de melhorar a implementação de uma gestão sustentável da erosão costeira, com base científica, na Europa. Contudo, não houve nenhum caso de aplicabilidade em Portugal. A estratégia de GIZC em Portugal terminou em 2009 (Instituto da Água, 2009).

O desenvolvimento de ferramentas acessíveis para previsão de alterações morfológicas costeiras, identificação de riscos costeiros e localização de áreas específicas de elevado risco associado (hotspot) são essenciais para tomadas de decisão de gestão costeira e mitigação das consequências associadas a vulnerabilidades costeiras.

Com aplicação numa zona portuária da costa oeste portuguesa foi desenvolvido o sistema HIDRALERTA de previsão, alerta e avaliação de risco associado ao galgamento e inundação em zonas costeiras e portuárias, a partir de medições/previsões da agitação marítima nessas zonas (Fortes *et al.*, 2013; Garcia *et al.*, 2016).

Com base em experiências adquiridas de projetos anteriores nomeadamente COASTVIEW (Davidson *et al.*, 2007; Van Koningsveld *et al.*, 2007) e CONSCIENCE (Marchand, 2010) surgiu o projeto [MICORE](#) (Ciavola *et al.*, 2011). O sistema arenoso costeiro da Praia de Faro foi um dos 9 casos de estudo, em foco neste projeto europeu. O MICORE foi desenvolvido para suportar e orientar a implementação da Estratégia Internacional para a Redução de

Desastres, nomeadamente no seu plano de ação entre 2005 e 2015. Com a execução deste projeto pretendeu-se desenvolver e demonstrar ferramentas de previsão em tempo real de alterações na morfologia costeira face a eventos de tempestade e, desta forma, fornecer suporte à criação de medidas de mitigação (e.g. realimentação de praia, remoção/relocação de estruturas), por parte das autoridades de proteção civil, relativamente aos impactes resultantes desses eventos (Ferreira *et al.*, 2009a). No projeto MICORE foram desenvolvidos Indicadores de Impacto de Tempestades (SIIs) para fornecer avaliações de risco relacionadas a tempestades na Praia de Faro (Almeida *et al.*, 2010, 2012).

Em novembro de 2013, teve início o projeto de investigação Europeu [RISC-KIT](#) (Resilience-Increasing Strategies for Coasts – toolKIT) que teve como objetivo principal o desenvolvimento de métodos, ferramentas e abordagens de gestão para reduzir o risco e aumentar a resiliência a eventos hidro-meteorológicos de baixa frequência e alto impacto com aplicação em 10 zonas costeiras europeias. Nomeadamente, um dos casos de estudo consistiu no sistema de ilhas e penínsulas barreira da [Ria Formosa](#). Uma ferramenta resultante desse projeto foi a CRAF1 (Coastal Risk Assessment Framework – Phase 1), a partir do qual é possível identificar de forma rápida e acessível quais as áreas atuais e futuras de risco costeiro (“*hotspot*”) a nível regional devido a diversos perigos (Ferreira *et al.*, 2016b e 2018; Viavattene *et al.*, 2015b e 2018). A metodologia proposta pela abordagem CRAF1 foi seguida no presente trabalho para a identificação de áreas costeiras de maior risco ao longo da zona em estudo derivadas de perigos de erosão e galgamento. Esta abordagem foi igualmente utilizada em outros estudos para identificação de potenciais *hotspots* relativos a perigo de erosão (e.g. Armaroli e Duo, 2017; De Angeli *et al.*, 2017; Jiménez *et al.*, 2017) e galgamento (e.g. Ferreira *et al.*, 2016b; Valchev *et al.* 2016).

Caraterizados como sistemas altamente dinâmicos, as zonas costeiras estão em constante transformação e adaptação face à influência de fatores geomorfológicos e oceanográficos. Os processos induzidos por tempestades em ilhas barreira são agrupados em erosão costeira, galgamento, inundação e rompimento de barreira (Roelvink *et al.*, 2003; McCall *et al.*, 2010; Ferreira *et al.*, 2006b). Estes processos são de carisma natural e contribuem para a evolução natural dos sistemas de ilhas barreira, contudo também representam perigos potenciais para comunidades costeiras e ecossistemas naturais (Lorenzo-Tuerba e Ashton, 2014; Plomaritis

*et al.*, 2018). Assim, é imprescindível a avaliação de risco através de métodos viáveis, práticos e de simples implementação e posterior identificação de áreas com maior risco (*hotspots*) face à ação de diferentes perigos (e.g. erosão e galgamento) causados por tempestades costeiras com diferentes níveis de ação, como é o foco do presente trabalho.

As tempestades funcionam como agentes modeladores das zonas costeiras e influenciam a sua evolução de forma ativa, mas distinta, consoante diversos fatores intrínsecos às zonas costeiras onde atuam. Na perspetiva de estimar o impacto de tempestades em zonas costeiras, para além das características de tempestades individuais (e.g., Birkemeier, 1979; Dolan e Hayden, 1981; Backstrom *et al.*, 2008; Almeida *et al.*, 2012) ou de grupo de eventos de tempestade (e.g., Steetzel, 1993; Ferreira, 2005; Callaghan *et al.*, 2009; Almeida *et al.*, 2012), devem ser tomados em consideração as condições pré-existentes da linha de costa e a sua vulnerabilidade (Wright e Short, 1984; Forbes *et al.*, 1995), a orientação da linha de costa e a circulação costeira associada (Storlazzi *et al.*, 2000), a elevação e extensão do cordão dunar relativamente ao nível de tempestade (Thieler e Young, 1991; Ruggiero *et al.*, 2001; Morton, 2002; Houser *et al.*, 2008) e os processos de espraio (Holman, 1986; Sallenger, 2000; Stockdon *et al.*, 2006).

Os eventos de tempestades individuais são mecanismos importantes que podem desencadear alterações morfológicas relevantes, assim como, causar danos graves em estabelecimentos localizados na zona costeira (Birkemeier, 1979; Dolan e Hayden, 1981; Morton, 2002; Backstrom *et al.*, 2008). Contudo, os efeitos cumulativos de tempestades sucessivas juntamente com a ausência de recuperação da praia entre a ocorrência dos eventos de tempestade, realça os grupos de tempestades como uma categoria de eventos particulares que deve ser tomada em consideração aquando se pretende definir limites de impacto de tempestades (Ferreira, 2005, 2006; Callaghan *et al.*, 2009).

São vários os estudos que se debruçaram sobre o estudo das consequências de eventos extremos de tempestade individuais (e.g. Birkemeier, 1979; Dolan e Hayden, 1981; Balsillie, 1986, 1997; Dolan e Davies, 1994; Ferreira *et al.*, 1995; Morton *et al.*, 1995; Fenster *et al.*, 2001; Honeycutt *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2001; Morton, 2002), assim como, neste capítulo é abordada a análise de eventos de tempestade individuais. Contudo, a vulnerabilidade das praias à ação das tempestades é também parcialmente dependente na diferença entre a

frequência de tempestades individuais e o período de recuperação da praia. Se o período de recuperação da praia não for suficiente entre ocorrência de sucessivas tempestades individuais (i.e., grupo de tempestades) a erosão das praias é acentuada (Morton *et al.*, 1995). O estudo das consequências da incidência de grupos de tempestades na evolução e morfologia costeira é relativamente recente e os seus impactos cumulativos ainda não são devidamente compreendidos (Birkemeier *et al.*, 1999; Morton, 2002; Ferreira, 2002, 2005, 2006). Todavia, de acordo com os estudos existentes de Ferreira (2005, 2006) e Callaghan *et al.* (2009) os efeitos cumulativos de tempestades sucessivas associadas com ausência de recuperação da praia entre tempestades fazem com que os grupos de tempestade sejam uma categoria particular de eventos de tempestades que devem ser considerados aquando na definição de *thresholds* de impacto de tempestades. Apesar de, o presente trabalho não abordar a análise de ocorrência de grupos de tempestades e as suas consequências, assume-se a necessidade e importância de englobar o seu estudo em trabalhos futuros. Uma vez que, o agrupamento de eventos de tempestades relativamente menos severos que ocorram de forma sucessiva podem ter um impacto equivalente ou ainda mais significativo do que um evento de tempestade individual extremo (Ferreira, 2005). E, como constatado por Almeida *et al.* (2012), com base em registos históricos de impactos de tempestades observados na Península do Ancão, os danos mais graves verificados em infraestruturas foram originados por grupos de tempestades.

O risco costeiro derivado de diferentes perigos (*e.g.* erosão e galgamento) é obtido pelo produto entre a probabilidade de um dado perigo e os seus respetivos impactos (consequências). As consequências derivadas de eventos de perigo, afetam áreas pela forma de perda direta e indireta, por exemplo, danificação de edifícios e perda de stocks, mortalidade, perda de habitats e interrupção de serviços. As consequências podem ser calculadas através da intensidade das características de perigo (*e.g.* erosão e galgamento), a exposição dos recetores e a vulnerabilidade associada (Viavattene *et al.*, 2015a e 2018).

A vulnerabilidade é considerada como a extensão do dano, que pode ser esperado sob certas condições de exposição, suscetibilidade e resiliência (Balica *et al.* 2009; Scheuer *et al.* 2010; Willroth *et al.* 2010; Fuchs *et al.* 2011; Hufschmidt 2011). Mais especificamente, um sistema é suscetível a um dado perigo (*e.g.* erosão e/ou galgamento) não meramente devido à sua

exposição, mas em conjunto com a sua capacidade/incapacidade de resiliência, para fazer face a, recuperar ou adaptar-se à extensão do dano (Balica *et al.* 2012). No presente trabalho, a vulnerabilidade costeira é definida como o potencial de um sistema costeiro ser prejudicado pelos processos de erosão e/ou galgamento causados por tempestades costeiras (Mendoza e Jiménez, 2006; Mendoza, 2008) com diferentes níveis de ação.

A análise da capacidade de resiliência da zona costeira exposta aos eventos extremos também é de extrema importância e relevância para a tomada de decisões de intervenção nas zonas afetadas. Apesar de este tema não ser abordado no presente trabalho assume-se a necessidade da sua incorporação em estudos posteriores. Uma vez que, a definição atual de vulnerabilidade é reconhecida como útil, mas limitante, pois aborda apenas a avaliação do impacto à ameaça (Viavattene *et al.*, 2015a), e, visto que, a vulnerabilidade do sistema também deve ser reconhecida (Menoni *et al.*, 2010).

A vulnerabilidade é alcançada através do produto entre a sensibilidade/suscetibilidade e o valor do recetor. A sensibilidade expressa o nível de potencial de perdas associado com as características do perigo. Pode ser expresso de diferentes formas, por exemplo, como uma percentagem ou uma categoria (baixa, média, elevada). A sensibilidade também pode variar dependendo das características dos recetores. Por exemplo, uma infraestrutura de madeira pode ser mais suscetível a um dado perigo comparativamente a uma de cimento (Viavattene *et al.*, 2015a).

Os indicadores de perigo e exposição representam uma estimativa qualitativa ou quantitativa da vulnerabilidade, os quais têm em consideração tanto as características e influências dos perigos como a exposição dos recetores atingidos (Viavattene *et al.*, 2015a).

Os recetores correspondem a entidades potencialmente prejudicadas como, por exemplo, edifícios, infraestruturas, serviços de utilidade pública, estradas, pessoas, comunidades, uma cidade e a sua população, atividades económicas ou ecossistemas. A avaliação de perda tem foco, principalmente, nas perdas diretas, ou seja, apenas nos recetores diretamente em contato com o perigo (Viavattene *et al.*, 2015a) (e.g., derrocadas de edifícios erodidos). No entanto, também podem ocorrer perdas indiretas ou perdas induzidas, onde os recetores são impactados indiretamente pois ocorrem fora da área diretamente impactada (Messner *et al.*,

2007; Rose, 2010; Penning-Rowsell *et al.*, 2013) (e.g., interrupção de energia, se uma subestação de eletricidade for danificada, ou interrupção do tráfego, se uma estrada for bloqueada) ou após o evento (e.g, impactos de longo prazo na saúde) (Viavattene *et al.*, 2015a). A avaliação da perda nem sempre é possível obter de forma direta e simples. Nos casos em que o recetor tenha associado um valor económico é essa informação que se utiliza para atribuir um valor de perda potencial, sendo classificado como, uma perda tangível, caso contrário, são classificadas como perdas intangíveis (Viavattene *et al.*, 2015a). As avaliações quantitativas das perdas não foram abordadas no presente trabalho, para melhor percepção, consultar a descrição e desenvolvimento desse tema em Viavattene *et al.* (2015a).

## 5.2 Índices Costeiros

A determinação de Índices Costeiros (IC) segue uma abordagem existente e bem estabelecida por Gornitz (1990) com base no método baseado em índices. A metodologia consiste na combinação de vários indicadores num único índice, tornando possível a comparação rápida e eficaz de diferentes setores costeiros (Gornitz, 1990; McLaughlin *et al.*, 2002; Ramieri *et al.*, 2011; Balica *et al.*, 2012). A grande limitação deste tipo de abordagem consistia na incapacidade de englobar aspetos socioeconómicos (e.g. número de pessoas afetadas, infraestruturas potencialmente danificadas e custos económicos) na avaliação de vulnerabilidade costeira (Gornitz *et al.*, 1993; Cooper e McLaughlin, 1998). Para fazer fase a esta limitação foram desenvolvidas outras abordagens, onde a formulação original dos índices de vulnerabilidade costeira foi modificada e estendida, tomando também em consideração indicadores de perigo e de exposição, que demonstram capacidade de representar mais corretamente a complexidade dos sistemas costeiros, e tomando também em consideração fatores socioeconómicos (Ramieri *et al.*, 2011). A ferramenta CRAF1 consiste numa dessas abordagens vanguardistas.

A metodologia de CRAF1 combina diversos indicadores num único, mas, no entanto, o tipo de indicadores considerados, a forma como são classificados e a formulação utilizada para combinar estas variáveis varia entre casos de estudo, visto que, os IC são específicos para cada perigo e local em estudo (Ferreira *et al.*, 2016b). Uma dada zona costeira pode ter tantos IC como perigos existentes (Ferreira *et al.*, 2016b). É mesmo recomendado a aplicação da abordagem, individualmente para cada perigo, exceto quando exista dependência entre os

perigos em estudo (e.g. erosão ou abertura de barreira que induz inundação) (Viavattene *et al.*, 2015a).

Com base nestes fundamentos, de seguida será descrita a metodologia empregue no presente trabalho para determinação dos IC de Erosão e de Galgamento para períodos de retorno de 10 e 50 anos ao longo da zona em estudo, e consequente identificação de *hotspots*, de acordo com o enquadramento de avaliação de risco costeiro (CRAF1 – *Coastal Risk Assessment Framework -Phase 1*) descrito por Ferreira *et al.* (2016b).

Os Índices Costeiros (IC) associados aos perigos de erosão e galgamento foram determinados, para cada secção de 100 m ao longo da zona costeira em estudo, através da média geométrica do indicador de perigo ( $i_p$ ) e do indicador de exposição geral ( $i_{expG}$ ) segundo a seguinte fórmula

$$IC = \left[ (i_p * i_{expG}) \right]^{1/2} \quad (1)$$

Onde o indicador de exposição geral ( $i_{expG}$ ) corresponde à raiz geométrica de todos os indicadores de exposição e é dado por

$$i_{expG} = \left[ (i_{US} * i_{AC} * i_{RTAP} * i_{SUP} * i_{CS}) \right]^{1/5} \quad (2)$$

Onde os diferentes indicadores de exposição, nomeadamente, de Uso de Solo ( $i_{US}$ ), Atividade Comercial ( $i_{AC}$ ), Redes de Transporte e Acessos Públicos ( $i_{RTAP}$ ), Serviços de Utilidade Pública ( $i_{SUP}$ ) e Componente Social ( $i_{CS}$ ) representam os potenciais impactos diretos ou indiretos em cada secção na zona em estudo.

O indicador de perigo ( $i_p$ ) é classificado de 0 a 5 (nenhum, muito baixo, baixo, médio, elevado e muito elevado), onde 0 corresponde à ausência de perigo e 5 indica que a ocorrência do perigo é extremamente elevada. Os indicadores de exposição são classificados de 1 a 5 (não existente ou muito baixa, baixa, média, elevada e muito elevada), onde 1 representa as secções onde a exposição não existe ou é muito baixa e 5 onde é muito elevada.

Os IC são calculados individualmente para cada perigo e períodos de retorno associados (Ferreira *et al.*, 2016b). Consequentemente, no presente trabalho foram obtidos quatro IC

distintos representativos dos IC de Erosão e de Galgamento associados a períodos de retorno de 10 e de 50 anos (ICe10, ICe50, ICg10 e ICg50).

### 5.2.1 Indicador de Perigo de Erosão

Com o intuito de avaliar e estimar o recuo de um perfil natural resultante da ação de tempestades extremas ao longo do tempo, Kriebel e Dean (1993) desenvolveram o Modelo de Convolução. A metodologia envolvida neste modelo consistiu primeiramente no desenvolvimento de um método computacional para prever a erosão causada por uma tempestade vigorante com características específicas e, por fim, na agregação deste método num modelo maior que representaria as probabilidades de ocorrência de tempestades mais fortes (Kriebel e Dean, 1984). O fundamento em que se baseia este modelo consiste na assunção de que o perfil de praia se ajusta sempre no sentido de atingir a sua forma mais estável, ou seja, o perfil de equilíbrio.

O método de convolução já foi utilizado em diversos estudos, para avaliar a resposta de perfis de praia dependente do tempo, com resultados positivos nomeadamente para a zona costeira dos E.U.A. (Kriebel e Dean, 1993), para a costa oeste Portuguesa (Ferreira *et al.*, 1995; Ferreira, 1998; Ferreira e Dias, 2000) e para a Ria Formosa, nomeadamente com caso de estudo a Praia de Faro (Almeida *et al.*, 2011b). De acordo com este modelo o recuo da face de praia não é apenas em função das características da tempestade (altura e período das ondas, sobrelevação do nível do mar e duração do evento) mas também é em função da própria morfologia da praia emersa e imersa. As variáveis de entrada para a determinação do recuo máximo potencial da linha de costa num perfil de praia com dunas arenosas e bermas desenvolvidas são a altura da duna ( $Z_c$ , m), a elevação da crista da berma ( $B_c$ , m), largura da berma ( $B_{larg}$ , m) e o pendor da face de praia ( $\tan \beta$ ) (Figura 5.1). Os parâmetros relativos às tempestades são a altura da onda na rebentação ( $H_b$ , m), nível do mar ( $NivM$ , m) e a duração de tempestade ( $T_d$ , h). O procedimento seguido para a obtenção das matrizes de dados dos eventos de tempestade individualizados para o flanco ocidental e oriental é descrito no ponto 3.4 do Capítulo 3 do presente trabalho.

Para o perfil inicial (anterior à tempestade) os parâmetros  $Z_c$ ,  $B_c$  e  $B_{larg}$  são usados para representar um perfil de praia medido simplificado acima do NMM enquanto que o perfil de

equilíbrio desenvolvido por Dean (1977) é usado na parte abaixo do NMM, e é dado pela curva da lei de potência como:

$$h = Ax^{2/3} \quad (3)$$

Onde  $h$  é a profundidade da água a uma distância  $x$  ao largo, medida a partir da linha de costa dada pela interseção do perfil com o NMM. O parâmetro empírico  $A$  está relacionado e até mesmo dependente do tamanho médio dos sedimentos (Kriebel e Dean, 1984; Ferreira *et al.*, 1995). Masselink e Hughes (2003) afirmam que quanto maior o sedimento, maior o valor de  $A$ , e mais íngreme o declive de praia. De acordo com Kriebel e Dean (1993) o valor de  $A$  pode ser obtido através da seguinte fórmula:

$$A = 2.25(\omega^2/g)^{1/3} \quad (4)$$

Onde  $\omega$  corresponde à velocidade de sedimentação e  $g$  à aceleração gravítica. Esta expressão é válida para a gama de tamanhos de grãos de areia típicos entre 0.1-0.4 mm e para temperaturas de água de cerca de 20°C (Kriebel e Dean, 1993).

Para casos em que o perfil de praia a ser analisado engloba a existência de duna arenosa e o desenvolvimento de uma berma (Figura 5.1), como é verificado na zona costeira em estudo,

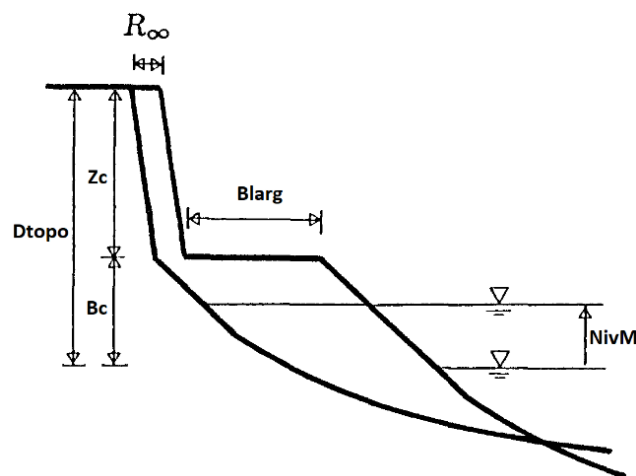


Figura 5.1 Esquema de resposta do Perfil de Equilíbrio em sistemas de praia com desenvolvimento de berma e duna. Onde  $R_{\infty}$  - Recuo máximo;  $D_{topo}$  - elevação da duna;  $Z_c$  - altura da duna;  $B_c$  - elevação da crista da berma;  $B_{larg}$  - largura da berma; e  $NivM$  - nível do mar.

a solução para a determinação da erosão dunar ( $R_\infty$ ) é obtida através da seguinte equação (Kriebel e Dean, 1993):

$$R_\infty = \frac{NivM(X_b - \frac{db}{\tan \beta})}{Bc + Zc + db - (\frac{NivM}{2})} - \frac{Blarg(Bc + db - (\frac{NivM}{2}))}{Bc + Zc + db - (\frac{NivM}{2})} \quad (5)$$

Onde  $X_b$  (m) é a largura da zona de surf/rebentação e é obtida pela fração entre a profundidade de rebentação (db, m) e o parâmetro adimensional A ( $X_b = (db/A)^{3/2}$ ). A profundidade de rebentação está relacionada linearmente com a altura de onda na rebentação ( $H_b$ , m) como  $db = H_b/\gamma$ , onde  $\gamma$  é o índice de rebentação e é usualmente assumido como 0.78 – 1 (Kriebel e Dean, 1993). Nestes casos de perfis com dunas e bermas, é assumido que o nível do mar (NivM, m; cf. Capítulo 3) não excede a elevação da crista da berma (Bc, m). A altura da duna ( $Zc$ , m) é obtida através da subtração da elevação da crista da berma à elevação da duna ( $D_{topo} - Bc$ ) (Kriebel e Dean, 1993).

A altura de duna ( $Zc$ ) entra como denominador na equação (5), de modo que a duna atue como um reservatório de areia e em cumulação com a presença de bermas bem desenvolvidas (Blarg, m) estes parâmetros podem reduzir potencialmente o recuo da face de duna ( $R_\infty$ ). De facto, as bermas podem ser tão desenvolvidas ao ponto que são obtidos valores de recuo de duna inferiores a zero ( $R_\infty < 0$ ) indicando que não ocorre recuo de duna e que apenas a berma é erodida (Kriebel e Dean, 1993).

Uma aplicação desta formulação (5) com bastante potencial, consiste na determinação da largura de berma necessária para eliminar a hipótese de recuo dunar numa praia, através da sua resolução em função da largura de berma (Blarg), assumindo que o recuo dunar é nulo ( $R_\infty = 0$ ) (Kriebel e Dean, 1993).

A escala temporal da resposta de um perfil, aparentemente, não pode ser encontrada a partir de comparações geométricas simples de formas de perfis de equilíbrio pré e pós-tempestade (Kriebel e Dean, 1993). Assim, Kriebel e Dean (1985) desenvolveram um modelo numérico de erosão, posteriormente calibrado por Kriebel (1986), para determinação de escalas de tempo de erosão. Como resultado surgiu uma expressão empírica que descreve a escala temporal de resposta do perfil,  $T_s$ , conforme descrita por Kriebel e Dean (1993) e é dada por

$$T_s = C_1 \frac{H_b^{3/2}}{g^{1/2} A^3} \left(1 + \frac{db}{Bc} + \frac{\tan \beta X_b}{db}\right)^{-1} \quad (6)$$

Onde o  $C_1$  é um coeficiente adimensional, pode ser determinado através do pendor dos dados, e é igual a 320. Para casos de erosão de duna, a altura de duna ( $Z_c$ ) tem que ser adicionada à a elevação da crista da berma ( $B_c$ ) (Kriebel e Dean, 1993).

A solução para a resposta de erosão dependente do tempo  $R(t)$ , tem forma adimensional, é em função de apenas um parâmetro  $\beta$ , e é apresentada como:

$$R(t) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{\beta^2}{1+\beta^2} \exp\left(-\frac{2\sigma t}{\beta}\right) - \frac{1}{1+\beta^2} [\cos(2\sigma t) + \beta \sin(2\sigma t)] \right\} \quad (7)$$

Onde  $\sigma = \pi/T_D$ , sendo  $T_D$  correspondente à duração total de ocorrência de uma tempestade.  $\beta$  corresponde à taxa de erosão escales-temporal relativa à duração de tempestade dada por,

$$\beta = 2\pi \frac{T_s}{T_D} \quad (8)$$

Por último para obter o valor de recuo máximo realiza-se o produto entre a resposta de erosão dependente do tempo  $R(t)$  e a erosão dunar ( $R_\infty$ ),

$$R_{max} = R(t) * R_\infty \quad (9)$$

Os valores de recuo máximos ( $R_{max}$ ) foram obtidos para cada secção de 100 m por tempestade de O-SO e E-SE, para as praias do flanco ocidental e oriental, respetivamente, com base nas matrizes de dados morfológicos e de níveis do mar com dados de eventos de tempestades associados (*cf.* Capítulo 3) através de scripts com análise numérica no programa MATLAB.

Após toda a análise anteriormente descrita, os resultados de recuos máximos ( $R_{max}$ ) para cada secção de 100 m das praias arenosas em estudo por cada evento de tempestade, foram organizados, analisados e extrapolados. Este procedimento foi realizado segundo métodos estatísticos, tal como a análise de regressão de mínimos quadrados, para a determinação de valores de recuo máximo extremos correspondentes a períodos de retorno de 10 e 50 anos. Para esse efeito, foi seguido a metodologia descrita por Kamphuis (2010) relativamente a análises de onda de longo-prazo, conforme será descrito de seguida.

As análises de dados de onda de longo-prazo proporcionam uma distribuição teórica de probabilidade de ocorrência de parâmetros de onda ao longo de vários anos. Este tipo de análise tem dois propósitos: a organização dos dados e a sua extrapolação para a determinação de valores extremos que ocorrem em baixas probabilidades de excedência (Kamphuis, 2010).

A organização dos dados de recuos máximos passou pela sua distribuição por classes e obtendo o respetivo número de ocorrências, para de seguida aplicar a função de distribuição acumulada (FDA) (Kamphuis, 2010),

$$F(x) = P(X \leq x) = P \quad (10)$$

Onde a variável  $X$  é relativa aos recuos máximos. A partir da divisão dos valores da acumulação das ocorrências ( $O_1, O_1+O_2, O_1+O_2+O_3 \dots O_t$ ) pelo número total de ocorrências ( $O_t$ ), obtém-se a probabilidade  $P$  (p. ex.  $P(R_{\max} < x_1) = O_1/O_t$ ;  $P(R_{\max} < x_2) = O_1 + O_2/O_t$ ). Os dados resultantes da FDA estão organizados, mas não é possível realizar a partir dos mesmos uma extrapolação, pois a curva obtida pela representação gráfica destes resultados não é retilínea, isto é, não se ajusta a uma análise de regressão linear ( $Y = AX + B$ ). Para tal é necessário proceder à transformação dos dados para obter uma curva retilínea através da transformação dos eixos, segundo um modelo de distribuição (Kamphuis, 2010). Assim, procedeu-se ao cálculo da probabilidade de excedências ( $Q$ ) (Kamphuis, 2010),

$$Q = Q(X > x) = 1 - P \quad (11)$$

E aplicou-se o modelo de distribuição de Weibull ( $W$ ), bastante versátil por possuir três parâmetros ( $\alpha, \beta$  e  $\gamma$ ) e especialmente desenvolvida para análises de valores extremos.

$$W = \left( \ln \frac{1}{Q} \right)^{1/\alpha} = \frac{x-\gamma}{\beta} \quad (12)$$

Onde o coeficiente  $\alpha$  pode ser assumido com 0.8 ou 1.3 (Kamphuis, 2010). No presente trabalho foi assumido como igual a 0.8 derivado dos melhores ajustes retilíneos observados em diversas análises de regressão linear efetuadas. Os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  estão relacionados com as constantes  $A$  e  $B$  da equação da reta de regressão linear (Figura 5.2), onde  $A = 1/\beta$  e  $B = -\gamma/\beta$ .

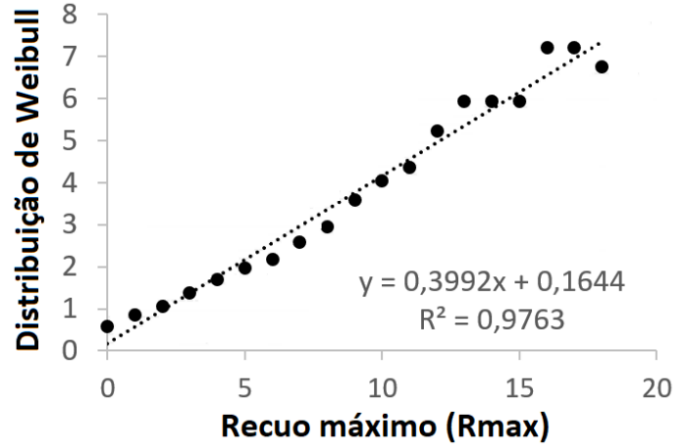


Figura 5.2 Exemplo de distribuição de Weibull (W) adaptada aos dados de recuo máximo (Rmax, m) de uma secção da Península do Ancão. Com representação da respetiva reta e equação de regressão linear, a partir da qual foi possível obter os valores de A = 0.3992 e B = 0.1644.

Os procedimentos de análise de dados de onda de longo-prazo, descritos anteriormente, organizam e transformam os dados, com o intuito de se desenvolverem relações lineares que podem ser interpoladas ou extrapoladas com alguma confiança para menores probabilidades de excedência (Kamphuis, 2010). Após este procedimento, já é possível determinar valores de recuo máximo para diferentes períodos de retorno (PR). A probabilidade de excedência de um evento em anos de PR é dada por,

$$Q = \frac{1}{\lambda * PR} \quad (13)$$

Onde  $\lambda$  corresponde ao número de eventos de tempestade por ano para o qual a análise é baseada. Com base na equação 12 e 13 obtém-se a seguinte fórmula de extrapolação,

$$Rmax_{PR} = \gamma + \beta (\ln\{\lambda * PR\})^{1/\alpha} \quad (14)$$

A partir da qual foi possível determinar os valores de recuo máximo ( $Rmax_{PR}$ ) para períodos de retorno de 10 e 50 anos (casos de interesse para o presente estudo e comumente utilizados para gestão costeira em Portugal) para cada secção de 100 m ao longo da zona em estudo. Com base nestes valores foi ilustrado o índice de perigo de erosão na zona em estudo para períodos de retorno de 10 e 50 anos ( $i_{pE10}$  e  $i_{pE50}$ ). Onde, as classes de recuo foram distribuídas entre 0 e 5 que correspondem, respetivamente, a recuos nulos ou muito reduzidos e recuos muito elevados.

## 5.2.2 Indicador de Perigo de Galgamento

O galgamento ocorre quando o nível do mar (NivM:  $NMM + Storm Surge$ ) se encontra abaixo da elevação superior da barreira ( $Z_D$  - crista da berma ou topo da duna) mas, no entanto, os níveis de run-up máximos ( $R_{high}$ ) excedem esta elevação  $Z_D$  (Donnelly, 2008; Figura 5.3).

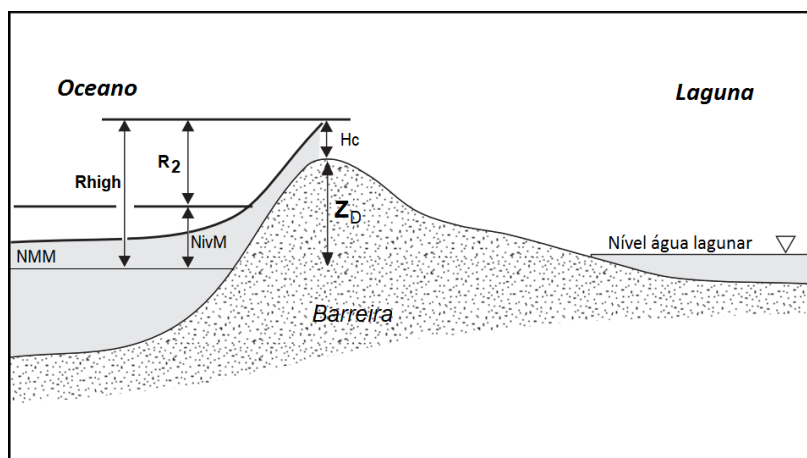


Figura 5.3 Esquema de uma barreira sobre a ocorrência de galgamento (adaptado de Donnelly, 2008).

Os galgamentos associados a eventos de tempestade extremos estão entre os perigos de maior impacto em zonas costeiras de baixas elevações (Plomaritis *et al.*, 2015). A percepção e quantificação da hidrodinâmica do galgamento numa barreira é essencial para entender os processos que causam erosão e deposição durante o galgamento, assim como, para quantificar a troca de água e sedimento do oceano para a barreira e laguna (Donnelly, 2008). No entanto, a complexidade dos processos envolvidos num galgamento tem inibido a sua consideração em avaliações de risco costeiro (Plomaritis *et al.*, 2015).

Existem modelos morfodinâmicos numéricos para a determinação de galgamento e erosão costeira (Roelvink *et al.*, 2009; McCall *et al.*, 2013), que são bastante utilizados, mas a sua aplicação é complexa e exige capacidades computacionais elevadas e uma variedade e quantidade de dados de entrada o que dificulta a sua utilização e restringe a sua aplicação a nível local (Plomaritis *et al.*, 2015). Com o intuito de agilizar esta situação Plomaritis *et al.* (2015, 2018) desenvolveram uma abordagem baseada na relação de similaridade desenvolvida por Donnelly (2008). Esta abordagem foi adaptada no presente trabalho com o

intuito de obter a extensão e profundidade de galgamento em cada secção de 100 m ao longo da zona de estudo tanto para 10 como 50 anos de período de retorno.

A profundidade de água máxima na crista da barreira durante o galgamento ( $H_c$ ) pode ser calculada com base na relação de similaridade, assumindo um perfil de água linear no momento de run-up máximo (Donnelly, 2008; Figura 5.4). Esta formulação é similar à sugerida por Schuettrumpf e Oumeraci (2005); contudo é expressa em termos de profundidade de água ao nível médio do mar (NMM) durante o momento de máximo run-up, ao invés de uma constante empírica (Donnelly, 2008).

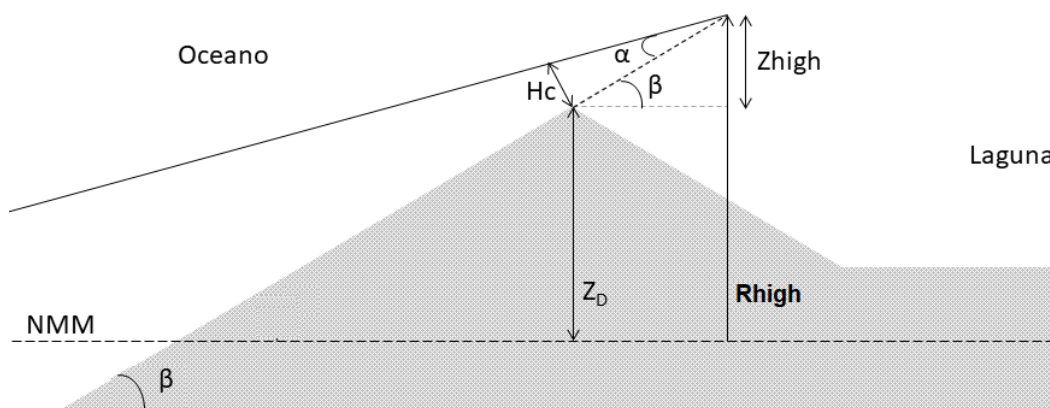


Figura 5.4 Esquema demonstrando o nível de água assumido no ponto de run-up máximo e a relação linear usada para estimar a profundidade de água máxima durante o galgamento (adaptado de Schuettrumpf e Oumeraci, 2005).

Onde  $Z_D$  corresponde à elevação da crista da barreira (e.g. crista da berma ou topo de duna),  $\beta$  refere ao pendor do perfil de praia,  $R_{high}$  é o nível de *run-up* máximo ( $R_2 + NivM$ ; cf. Capítulo 4).

Com base nesta assunção de perfil linear é possível determinar através de trigonometria simples (Donnelly, 2008), a profundidade de água máxima na crista da barreira durante o galgamento ( $H_c$ ), segundo:

$$H_c = \tan \alpha \frac{Z_{high}}{\sin \beta} \quad (15)$$

Onde  $Z_{high}$  corresponde à diferença entre  $R_{high}$  e  $Z_D$ .  $\tan \alpha$  é a tangente do pendor de *run-up* (“*run-up lens slope*”) resultante de experiências realizadas em diques, realizadas por Schuettrumpf e Oumeraci (2005; Tabela 5.1).

Tabela 5.1 Tangente do pendor de *run-up* medido em diques segundo Schuettrumpf e Oumeraci (2005) com respectivos coeficientes de correlação (r).

	$\tan \alpha$	$\tan \beta$	r
<b>Hc2%</b>	0.035	0.17	0.72
<b>Hc2%</b>	0.054	0.25	0.60

Foi assumido como 0.035 por ser considerado o mais apropriado relativamente aos pendores de praia característicos da zona em estudo, assim como, Plomaritis *et al.* (2015) também referem este valor como o mais apropriado. Após a determinação da profundidade de galgamento ( $H_c$ ) é possível determinar a velocidade na crista da barreira ( $U_c$ ) através da seguinte equação:

$$U_c = Cu\sqrt{gH_c} \quad (16)$$

onde  $Cu$  é um coeficiente (“*bore front coefficient*”) com valor de 1.53 para praias arenosas (Donnelly, 2008) ou 2.6 em barreiras cascalhentas (Matias *et al.*, 2014). Sendo o primeiro valor assumido no presente trabalho para a totalidade da zona em estudo. A variação de  $H_c$  e  $C$  pode ser estimada analiticamente para a zona interior da barreira (Donnelly, 2008).

O fluxo de galgamento ao longo da barreira interior é influenciado por outros processos, tais como, a infiltração e o escoamento lateral. Estes parâmetros são altamente influenciados por características hidrodinâmicas e morfológicas do sistema (Plomaritis *et al.*, 2018). Tomando todos os processos em consideração Donnelly *et al.* (2009) alcançaram a seguinte equação para obter a extensão de galgamento ao longo da área da zona interior da barreira:

$$h(x) = \frac{1}{1+\mu x/B_D} H_c \exp\left(-\frac{a}{k_f} \frac{x}{\sqrt{gH_c}}\right) \quad (17)$$

onde  $\mu$  é a taxa de escoamento longitudinal linear,  $B_D$  é a largura longitudinal do galgamento na crista ou a largura da depressão da duna interna,  $a$  é a constante de proporcionalidade para a infiltração e  $k_f$  é o parâmetro de fricção. Podem ser realizadas adaptações e simplificações a esta equação generalista, de forma a se focar nos processos mais significantes em cada zona de estudo (Plomaritis *et al.*, 2015, 2018). A abordagem simplificada adotada por Plomaritis

*et al.* (2015, 2018), e com aplicação na zona em estudo do presente trabalho, assume que a evolução de  $H_c$  na zona interna da barreira apenas depende das perdas de volume devido à infiltração, e que não existe escoamento longitudinal do fluxo ou variações acentuadas do fluxo de velocidade na barreira interior. Arrogando assim, que o galgamento é longitudinalmente homogéneo, resultante de uma onda de crista longa, segundo a seguinte equação:

$$h(x) = H_c \exp\left(-a \frac{x}{U_c}\right) \quad (18)$$

onde a constante de proporcionalidade para a infiltração ( $a$ ) foi assumida como 0.12 em zonas de barreira arenosa e 0.01 em zonas urbanizadas (praticamente impermeáveis) (Donnelly *et al.*, 2006b).

Com base nas equações 15 e 18 foi possível determinar, respetivamente, a profundidade ( $H_c$ ) e extensão ( $h$ ) de galgamento em cada secção de 100 m ao longo da zona de estudo para períodos de retorno de 10 e 50 anos. Com base nos valores de profundidade ( $H_c$ ), foi ilustrado o índice de perigo de galgamento na zona em estudo para períodos de retorno de 10 e 50 anos ( $i_{pG10}$  e  $i_{pG50}$ ). Onde, as classes da profundidade de galgamento foram distribuídas entre 0 e 5 que correspondem, respetivamente, a intensidades nulas ou muito reduzidas e a intensidades muito elevadas.

### 5.2.3 Extensão de Perigo de Erosão e de Galgamento

A extensão de perigo, ou seja, as zonas interiores das barreiras arenosas influenciadas pelo dado perigo em cada secção para os períodos de retorno considerados, consiste na base da avaliação de impacto. Os indicadores de exposição são aplicados a uma determinada extensão de perigo e, dependendo, dos elementos expostos ao perigo nessa extensão, o valor final do índice costeiro pode ser diferente (Ferreira *et al.*, 2016b).

A exposição de perigo recomendada por Ferreira *et al.* (2016b) e usada no presente trabalho consiste numa zona buffer com uma determinada distância desde a linha de base da duna. A distância para o perigo de erosão foi definida com base nos valores de recuo máximo obtidos

no presente trabalho e a distância para o perigo de galgamento com base nos valores de extensão de galgamento obtidos para cada secção ao longo da zona em estudo.

## 5.2.4 Indicadores de Exposição

Os indicadores de exposição ( $i_{expG}$ ) medem a exposição, relativa a diferentes categorias de impacto, dentro da extensão de perigo dos períodos de retorno considerados (Ferreira *et al.*, 2016). No presente trabalho foram considerados os seguintes indicadores de exposição: Uso de Solo ( $i_{US}$ ), Atividade Comercial ( $i_{AC}$ ), Redes de Transporte e Acessos Públicos ( $i_{RTAP}$ ), Serviços de Utilidade Pública ( $i_{SUP}$ ) e Componente Social ( $i_{CS}$ ). Para os quais foram realizados os seguintes métodos de avaliação:

### 5.2.4.1 Uso de Solo ( $i_{US}$ )

O indicador de exposição de Uso de solo ( $i_{US}$ ) mede a exposição relativa a usos do solo ao longo da zona em estudo. Para a caracterização do uso do solo foram utilizados os dados facultados pelo Parque Natural da Ria Formosa, a partir dos quais foi possível obter a distribuição espacial e respetiva informação do tipo de cobertura do solo identificado. Desses dados, foram seleccionadas as unidades englobadas na zona em estudo, às quais foram associadas um valor de importância (1 – Pouco relevante a 5 – Muito relevante; Tabela 5.2) atribuído consoante a capacidade de resiliência do tipo de uso de solo identificado. Sendo que, os valores de menor importância foram atribuídos a tipos de ocupação natural visto ser expectado que estes apresentem maior capacidade de resiliência a eventos de tempestade.

Tabela 5.2 Classificação do valor de importância relativo ao uso do solo.

Avaliação	Classificação	Descrição
1	Pouco relevante	Praia, pinhal e subcoberto arbustivo associado, caniçal, pousios e áreas abandonadas com vegetação nitrófila ou subnitrófila, comunidades de espécies exóticas infestantes, cursos de água e lagoas Juncal, lodocais e areias intertidais, áreas subtidais, ilhéus arenosos
2	Média relevância	Salinas ou pisciculturas abandonadas, matos halófitos altos e baixos, sapal mosaico, dunas embrionárias

3	Relevante	Dunas cinzentas, prados de spartina, dunas brancas
4	Bastante relevante	Piscicultura
5	Elevada relevância	Áreas urbanas

Com base nas diferentes áreas de cada secção, resultantes da intersecção entre as zonas de buffer das extensões de erosão e galgamento e as tipologias de uso de solo (Figura 5.5), foram determinados os valores utilizados para a classificação do índice de uso do solo. Estes valores foram obtidos para cada secção através do somatório do produto entre o valor da(s) área(s) de cada secção e respetivos valores de importância de uso do solo:

$$i_{US} = \sum_{i=0}^n A_i V_i \quad (19)$$

onde  $n$  é o número de classes de uso do solo,  $A$  é a área ( $m^2$ ) e  $V$  é o valor de importância (0 a 5). Os resultados finais foram classificados numa escala de 1 a 5 para obtenção do índice de Uso de Solo ( $i_{US}$ ).

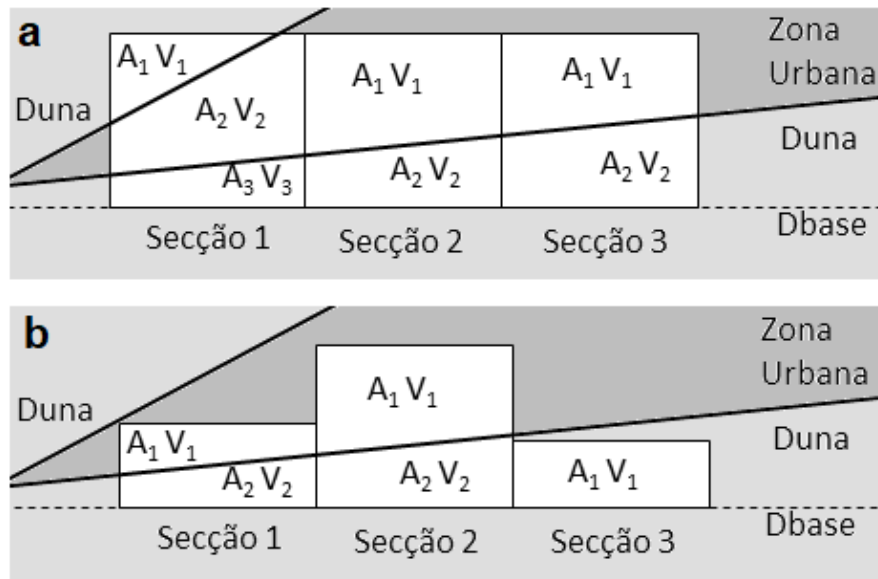


Figura 5.5 Esquema ilustrativo das áreas de cada secção definidas consoante a intersecção entre as zonas de buffer da extensão de erosão (a) e galgamento (b) e o tipo de uso de solo identificado.

#### 5.2.4.2 Atividade Comercial ( $i_{AC}$ )

O indicador de exposição de Atividade Comercial ( $i_{AC}$ ) avalia a exposição relativamente às atividades económicas ao longo da zona em estudo. A sua avaliação foi semelhante à do indicador anterior e também com base na informação disponível pelo Parque Natural da Ria Formosa. Foram selecionadas as áreas dos diferentes tipos de atividade comercial identificados (e.g. restaurantes, bares, piscicultura/aquacultura, entre outros) às quais foram associadas um valor de importância (1 – Pouco relevante a 5 – Muito relevante; Tabela 5.3). Aquacultura é uma das principais atividades económicas na zona em estudo e representa a maior produção de marisco, nomeadamente ameijoas, a nível nacional, razão pela qual o valor mais elevado (5) foi atribuído a esta atividade comercial.

Tabela 5.3 Classificação do valor de importância relativo à atividade comercial.

Avaliação	Classificação	Descrição
1	Pouco relevante	Salinas, concessão de praia
2	Média relevância	Parque de campismo
3	Relevante	Bar, restaurante, hotel, supermercado, clube
4	Bastante relevante	
5	Elevada relevância	Piscicultura/aquacultura

Os valores utilizados para a classificação do índice de Atividade Comercial ( $i_{AC}$ ) foram obtidos de acordo com o mesmo procedimento utilizado para o indicador de exposição de Uso de Solo.

#### 5.2.4.3 Redes de Transporte e Acessos Públicos ( $i_{RTAP}$ )

O indicador de exposição de Redes de Transportes e Acessos Públicos ( $i_{RTAP}$ ) analisa a exposição do conjunto de todas as vias de transportes e acessos públicos na zona de estudo. Este indicador foi representado através de áreas das zonas onde existem vias e acessos públicos (e.g. estradas, passadiços) na zona em estudo, obtidas com base na análise das fotografias aéreas do LiDAR 2009 e 2011. A rede de transportes e acessos públicos na zona em estudo é limitada a sistemas de importância a nível local e regional. Assim, os níveis representados na área foram classificados entre 1 e 3 (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 Classificação do valor de importância relativo à rede de transportes e acessos públicos.

Avaliação	Classificação	Descrição
1	Pouco relevante	Passadiços de madeira para acesso a praia ou estabelecimentos
2	Média relevância	Estradas secundárias em terra
3	Relevante	Estradas principais alcatroadas

Para a determinação do índice de Rede de Transporte e Acessos Públicos ( $i_{RTAP}$ ) não se quantificou o somatório de áreas correspondente a cada secção, como nos procedimentos anteriores. Após a intersecção entre os buffers de extensão de erosão e galgamento e as áreas de vias e acessos públicos, foi considerado que, para as secções onde se verifica intersecção, a classe de avaliação assumida para cada secção será a de maior nível registada na respetiva secção. Nas secções onde não existe intersecção considera-se de índice 1. Obtendo assim diretamente o índice de Rede de Transporte e Acessos Públicos ( $i_{RTAP}$ ) de escala entre 1 e 3.

#### 5.2.3.4 Serviços de Utilidade Pública ( $i_{SUP}$ )

O indicador de exposição de Serviços de Utilidade Pública ( $i_{SUP}$ ) avalia a exposição relativamente às redes de fornecimento de água e eletricidade longo da zona em estudo. A sua avaliação foi idêntica à do indicador anterior. As áreas representativas deste indicador correspondem às zonas onde existe sistema de esgotos, fornecimento de águas e eletricidade, e foram desenvolvidas a partir das fotografias aéreas do LiDAR 2009 e 2011. Os serviços de utilidade pública na zona em estudo são limitados a nível local, logo os níveis representados na área foram classificados de 1 e 2 (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 Classificação do valor de importância relativo aos serviços de utilidade pública.

Avaliação	Classificação	Descrição
1	Pouco relevante	Sistemas de águas e eletricidade em zonas rurais
2	Média relevância	Sistemas de águas e eletricidade em zonas urbanas

O índice de Serviços de Utilidade Pública ( $i_{SUP}$ ) foi obtido de forma semelhante ao indicador anterior. Após a intersecção entre os buffers de extensão de erosão e galgamento e as áreas

das zonas onde existe sistemas de esgotos, fornecimento de águas e eletricidade, foi considerado que, para as secções onde se verifica intersecção, a classe de avaliação assumida para cada secção será a de maior nível registada na respetiva secção. Nas secções onde não existe intersecção considera-se de índice 1. Obtendo assim diretamente o índice de Serviços de Utilidade Pública ( $i_{SUP}$ ) com classificação de 1 e 2.

#### **5.2.4.5 Componente Social ( $i_{CS}$ )**

O indicador de exposição de Componente Social ( $i_{CS}$ ) analisa a exposição relativa ao tipo de ocupação na zona em estudo. Neste indicador foi representada a distribuição espacial de habitações e acoplada informação sobre o tipo, características e localização de cada habitação identificada (e.g. 1ª residência, com 1 ou mais pisos, em meio rural) com base nos dados dos censos de 2011. Para quantificar a componente social na zona em estudo, foi realizada uma análise estatística aos dados de cada secção, que consistiu na contabilização percentual de casos de piores cenários. Os casos de pior cenário foram considerados como:

- 1ª residências – apresentam maior impacto na comunidade caso sejam afetadas;
- Habitações em zonas urbanas – por serem zonas densamente ocupadas e com acessibilidade precária, em caso de necessidade de evacuação, os poucos acessos existentes ficam rapidamente congestionados, o que torna a evacuação uma situação complicada;
- Habitações com mais de 1 piso/andar – a reparação/recuperação de casas é mais difícil/demorada e envolve maiores despesas quanto maiores dimensões as habitações apresentarem.

Após a obtenção das percentagens dos três casos de piores cenários em cada secção, estas foram transformadas numa variável padronizada ( $Z$ ) segundo:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (20)$$

Onde  $x$  representa a percentagem do pior cenário em cada secção,  $\mu$  e  $\sigma$  são, respetivamente, o valor médio e o desvio padrão do respetivo caso de pior cenário. O índice de Componente

Social ( $i_{CS}$ ) foi obtido através do somatório das variáveis padronizadas de cada caso de pior cenário em cada secção:

$$i_{CS} = \sum_{j=0}^m Z_j \quad (21)$$

Onde  $m$  corresponde ao número de casos de piores cenários e  $Z$  é a respetiva variável padronizada. Os resultados finais foram classificados numa escala de 1 a 5 para obtenção do índice de Componente Social ( $i_{CS}$ ).

## 5.3 Resultados

### 5.3.1 EROSÃO

Com a análise dos resultados de recuo máximos ( $R_{max}$ ) obtidos para cada secção de 100 m por tempestade de O-SO, para as praias do flanco ocidental (Península do Ancão e Ilha da Barreta; Figuras 5.6 e 5.7, respetivamente) e por tempestade de E-SE para as praias do flanco oriental (Ilhas da Culatra e Armona; Figuras 5.8 e 5.9, respetivamente), procurou-se uma relação para o padrão de distribuição de recuos máximos recorrente em cada praia.

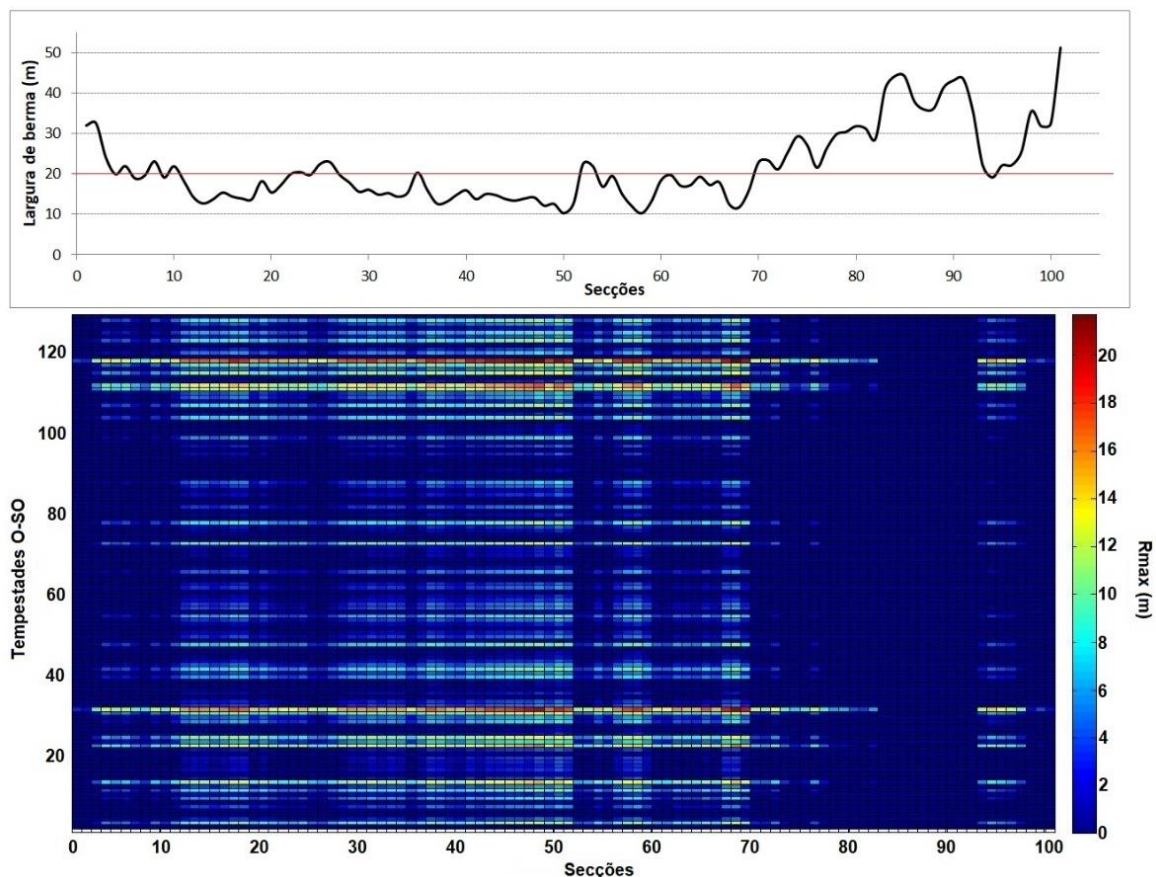


Figura 5.6 Variação da largura de berma (m) (em cima) e de recuo máximos ( $R_{max}$ ; m) por tempestades de O-SO (em baixo) em cada secção de 100m ao longo da Península do Ancão.

Em comparação com a variação das larguras de berma ao longo de cada praia, é notável que existe uma relação entre estes parâmetros, sendo evidenciado um limite de largura de berma (20 m) acima do qual os valores de recuo máximo reduzem consideravelmente, para as mesmas condições de tempestade. Indicando que as secções com larguras de berma acima deste *threshold* de 20 m são protegidas da ação das tempestades.

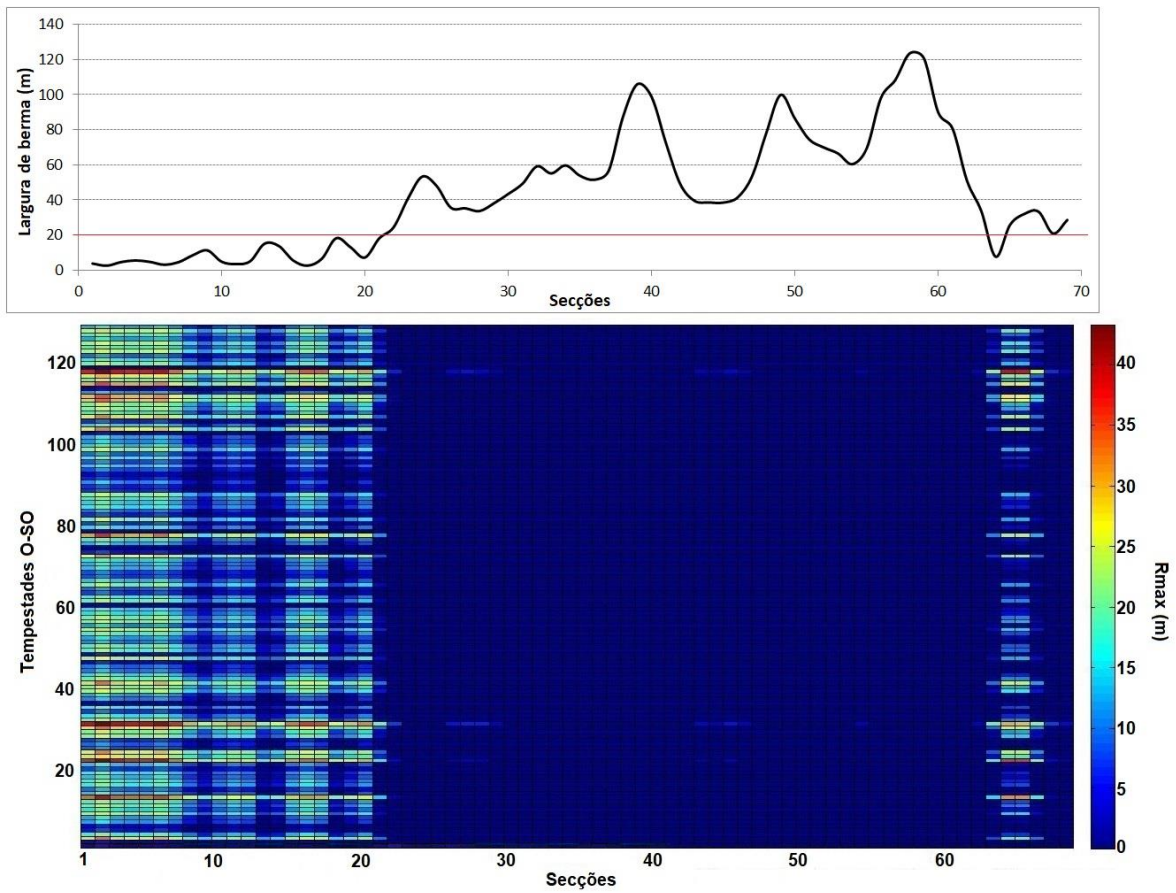


Figura 5.7 Variação da largura de berma (m) (em cima) e de recuo máximos (Rmax; m) por tempestades de O-SO (em baixo) em cada secção de 100m ao longo da Ilha da Barreta.

Este padrão entre os recuos máximos e a variação de largura de berma foi verificado tanto nas praias do flanco ocidental (Figuras 5.6 e 5.7) como nas praias do flanco oriental (Figuras 5.8 e 5.9).

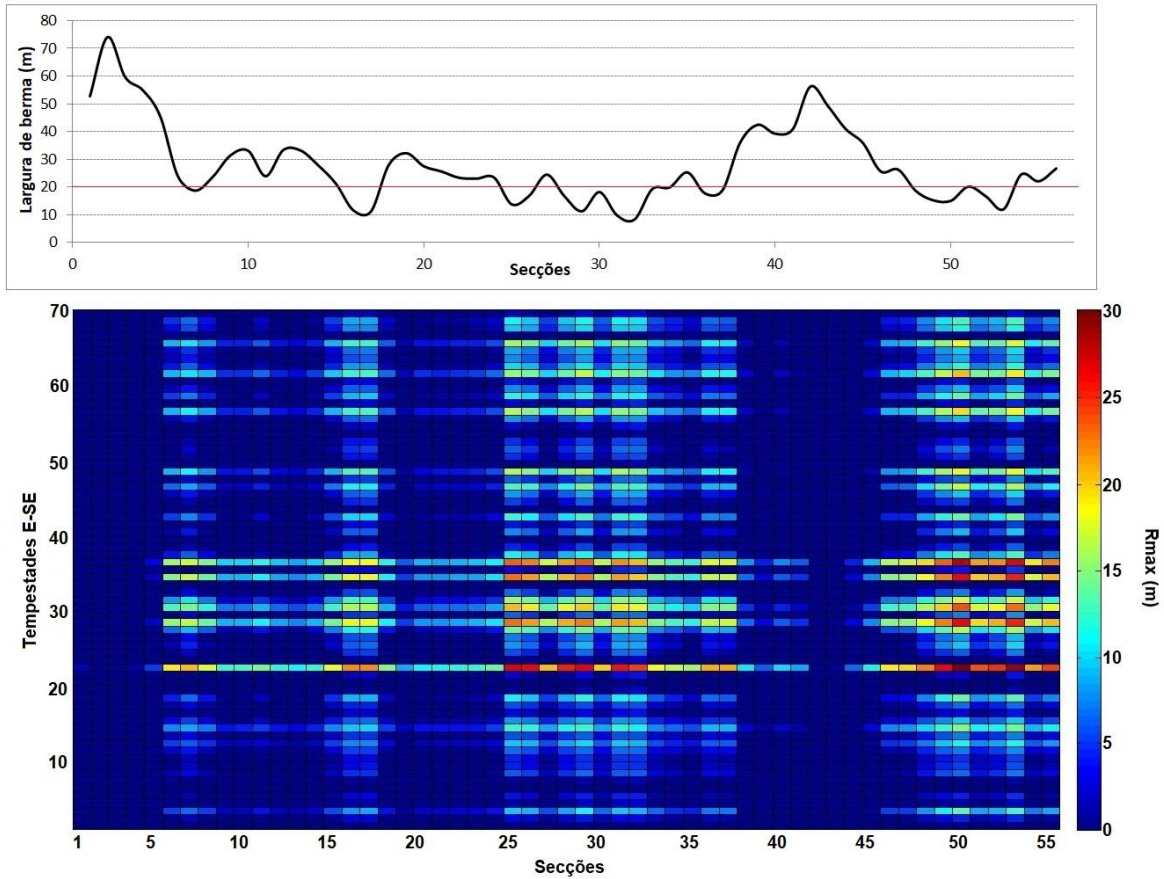


Figura 5.8 Variação da largura de berma (m) (em cima) e de recuo máximos (Rmax; m) por tempestades de E-SE (em baixo) em cada secção de 100m ao longo da Ilha da Culatra.

Assim como, o valor do threshold de largura de berma, acima do qual confere proteção às secções relativamente à ação das tempestades, foi igual (20 m) para todas as barreiras em estudo. É possível deduzir que, em zonas das barreiras arenosas em estudo que apresentem larguras de berma abaixo deste threshold será expectável que ocorram os maiores impactos por eventos de tempestades.

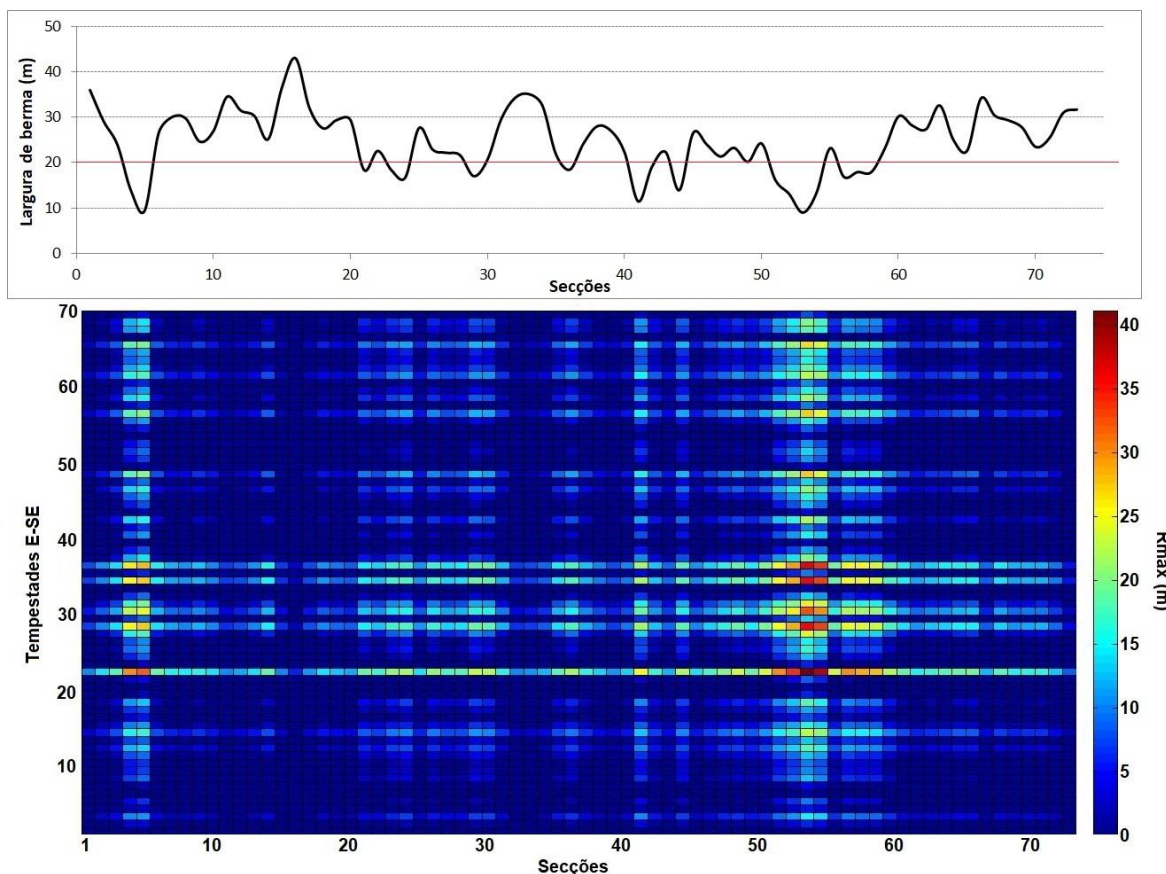


Figura 5.9 Variação da largura de berma (m) (em cima) e de recuo máximos ( $R_{max}$ ; m) por tempestades de E-SE (em baixo) em cada secção de 100m ao longo da Ilha da Armona.

A partir da determinação dos valores de recuo máximo ( $R_{max_{PR}}$ ) para períodos de retorno de 10 e 50 anos (casos de interesse para o presente estudo e comumente utilizados para gestão costeira em Portugal), para cada secção de 100 m ao longo da zona em estudo, foram alcançados os índices de perigo de erosão na zona em estudo para períodos de retorno de 10 e 50 anos ( $i_{pE10}$  e  $i_{pE50}$ ). Estes índices estão ilustrados nas Figuras 5.10 e 5.11, onde as classes de recuo foram distribuídas entre 0 e 5, sendo **0** correspondente a recuos obtidos inferiores a 1 m; **1** entre 1.01 e 5 m; **2** entre 5.1 e 10; **3** entre 10.1 e 15; **4** entre 15.1 e 20; e **5** superiores a 20 m de recuo.

De acordo com o índice de perigo de erosão para período de retorno de 10 anos (Figura 5.10) para praticamente toda a extensão da Península do Ancão apresenta valores de recuos entre 5 e 20 m, com exceção das secções entre a extremidade poente da zona central e a extremidade nascente da zona oriental, que apresentam recuos inferiores a 1 metro, e das últimas secções

da extremidade nascente da zona oriental, que apresentam recuos inferiores a 1 m ou no máximo até 5 m. As seções densamente urbanizadas da Praia de Faro são onde se verificam os maiores valores de recuos, podendo-se verificar até 20 m de recuo. Na Ilha da Barreta, praticamente toda a extensão da zona ocidental apresenta valores de recuo superiores a 20m. A zona oriental apenas apresenta valores de recuo desde 5 m ou até superiores a 20 m nas seções da extremidade nascente, imediatamente a Este do Cabo de Santa Maria. Na Ilha da Culatra praticamente toda a zona ocidental apresenta valores de recuo entre 5 e 20 m, com exceção a extremidade poente onde os recuos são inferiores a 1 m. Na zona oriental, tanto a extremidade poente como a nascente apresentam recuos elevados sempre superiores a 15 m. Apenas nas seções centrais da zona oriental os recuos são mais reduzidos, variando na maioria entre 1 a 15 m, apresentando apenas duas seções onde os recuos podem atingir entre os 15 e 20 m. Na Ilha da Armona, para praticamente toda a extensão da zona ocidental os recuos variam entre 5 e 20 m, exceto 2 seções na extremidade poente e 1 na extremidade nascente onde se podem verificar recuos superiores a 20 m. Na zona oriental verificam-se na maioria recuos entre 5 e 20 m e nas seções onde se localiza a concessão da praia da Fuseta os recuos podem ser superiores a 20 m.

Para PR de 50 anos verifica-se que se mantém o padrão de distribuição das seções com recuos consideráveis ao longo da zona em estudo. Contudo, verifica-se um aumento considerável dos valores observados, para recuos superiores a 20 m na maioria dessas seções. Com exceção, a Ilha da Barreta, onde se verifica apenas um aumento nos valores de recuo numa ou outra seção da zona oriental.



Figura 5.10 Índice de Perigo de Erosão para período de retorno de 10 anos ( $i_{pE10}$ ) na zona em estudo.



Figura 5.11 Índice de Perigo de Erosão para período de retorno de 50 anos ( $i_{pE50}$ ) na zona em estudo.

### 5.3.2 GALGAMENTO

Com base nos valores de profundidade ( $H_c$ ) de galgamento para cada secção de 100 m ao longo da zona em estudo, que representam o potencial de galgamento, foram alcançados os índices de perigo de galgamento na zona em estudo para períodos de retorno de 10 e 50 anos

( $i_{pG10}$  e  $i_{pG50}$ ). Estes índices estão representados nas Figuras 5.12 e 5.13, onde as classes da profundidade de galgamento foram distribuídas entre 0 e 5, sendo **0** correspondente a profundidades inferiores a 0.05 m; **1** entre 0.051 e 0.15 m; **2** entre 0.151 e 0.35; **3** entre 0.351 e 0.65; **4** entre 0.651 e 1.05; e **5** superiores a 1.05 m de profundidade.

De acordo com o índice de perigo de galgamento para períodos de retorno de 10 anos (Figura 5.12), na Península do Ancão, praticamente para toda a extensão da zona central, verificam-se profundidades de galgamento superiores a 0.15 m e ocorre uma seção (localizada na zona do estacionamento à entrada da praia de Faro) onde os valores podem ser entre 0.65 a 1.05 m. Na zona oriental, verificam-se valores entre 0.15 e 0.35 m na seção localizada na zona de reabertura da Barra do Ancão, e na seção da extremidade nascente. Na Ilha da Barreta, em toda a extensão da zona ocidental, que corresponde a uma restinga arenosa praticamente desprovida de um sistema dunar, verificam-se os índices de perigo mais elevados de toda a zona em estudo, superiores a 1.05 m. Para a maioria das seções da zona oriental também se verifica perigo a galgamento bastante considerável, entre 0.15 a 1.05 m. Para a Ilha da Culatra, não se verifica risco de galgamento em praticamente toda a extensão da zona ocidental, com exceção nas seções da extremidade poente, onde está localizada a comunidade do Farol, em que os valores de risco a galgamento são consideráveis, entre 0.15 e 0.35 m. O mesmo se verifica na zona oriental, onde apenas algumas seções na extremidade nascente, apresentam valores de risco a galgamento consideráveis a elevados, entre 0.15 a 1.05 m. Na Ilha da Armona, em praticamente toda a sua extensão o risco a galgamento é reduzido, com valores de profundidade de galgamento inferiores a 0.05 m, com exceção em algumas seções na extremidade poente da zona ocidental e na extremidade nascente da zona oriental, onde se verificam valores entre 0.15 e 0.65 m.

Para períodos de retorno de 50 anos (Figura 5.13) o padrão de distribuição do índice de perigo a galgamento ao longo da zona de estudo é idêntico ao de para PR 10 anos com algumas alterações a apontar em termos de intensificação do perigo a galgamento, principalmente, na zona central e oriental da Península de Faro, na zona oriental da Ilha da Culatra e na zona oriental da Ilha da Armona.



Figura 5.12 Índice de Perigo de Galgamento para período de retorno de 10 anos ( $i_{pG10}$ ) na zona em estudo.



Figura 5.13 Índice de Perigo de Galgamento para período de retorno de 50 anos ( $i_{pG50}$ ) na zona em estudo.

### 5.3.3 EXTENSÃO DE PERIGO DE EROÇÃO E DE GALGAMENTO

O alcance de exposição à erosão foi obtido com base nos resultados de recuo máximo obtidos no presente trabalho. Com base no valor médio de recuo máximo obtido para períodos de retorno de 50 anos (20 m) foi definida, a partir da linha de base da duna, a zona de buffer de 20 m de alcance de exposição a erosão constante ao longo da zona em estudo (Figura 5.14), considerada como a primeira linha de erosão. O mesmo valor de 20 m também foi assumido para a extensão de perigo de erosão por Ferreira *et al.* (2016b) com base nos valores máximos de recuo induzidos por tempestade obtidos para a Ria Formosa.



Figura 5.14 Esquema representativo da zona de buffer definida para o alcance de exposição à erosão.

O alcance de exposição ao galgamento foi obtido com base nos resultados de extensão de galgamento em cada secção de 100 m para períodos de retorno de 10 e 50 anos, obtidos no presente trabalho. A partir da linha de base de duna (Dbase), foram definidas as zonas de buffer com distâncias variáveis para cada secção de 100 m ao longo da zona de estudo consoante o respetivo valor de extensão de galgamento (Figura 5.15) para períodos de retorno de 10 e 50 anos.



Figura 5.15 Esquema representativo da zona de buffer definida para o alcance de exposição ao galgamento.

Posteriormente à definição destas extensões, foram analisadas as áreas resultantes da interseção entre esta zona de buffer e os indicadores de exposição, para classificação dos respetivos índices dos indicadores de exposição, conforme será descrito no subcapítulo seguinte.

### 5.3.4 INDICADORES DE EXPOSIÇÃO

Com base na representação espacial dos indicadores de exposição de Uso do Solo (Figura 5.16), Atividade Comercial (Figura 5.19), Rede de Transporte e Acessos Públicos (Figura 5.21) e Serviços de Utilidade Pública (Figura 5.23) e na sua interseção com as extensões de erosão, constante ao longo da zona em estudo, e de galgamento, variáveis em cada secção de 100 m da zona de estudo, para períodos de retorno 10 e 50 anos foram alcançados os índices de cada indicador (Figuras 5.18, 5.20, 5.22 e 5.24). A exceção foi o indicador de Componente Social (Figura 5.26), o qual foi obtido com base em análise estatística da ocupação na zona em estudo.

#### 5.3.4.1 Uso de Solo ( $i_{US}$ )

É possível observar na Figura 5.16, a representação espacial das diferentes categorias de uso de solo das ilhas barreiras em estudo, com destaque de uma área da Praia de Faro.

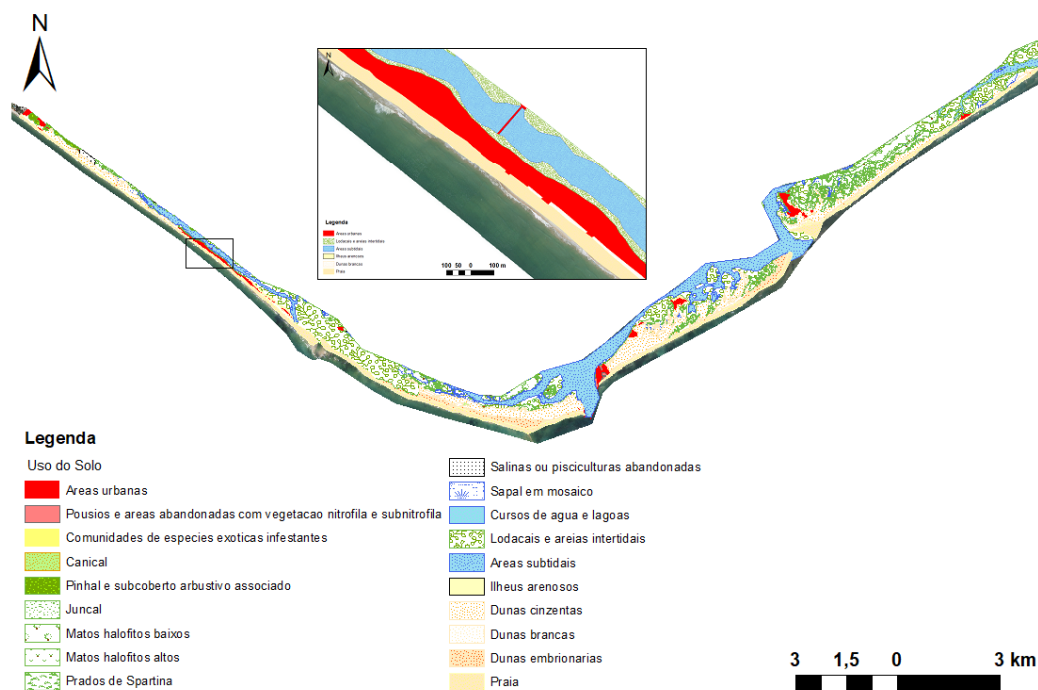


Figura 5.16 Representação espacial do indicador de Uso do Solo.

Na Figura 5.17 são apresentados, em termos exemplificativos, os resultados das interseções entre as zonas de buffer de erosão (1) e galgamento (2a e 2b) e o indicador de exposição de Uso do Solo, numa área da Praia de Faro. É de evidenciar que, para o caso de erosão foi

obtido apenas um índice por indicador, enquanto que, para galgamento foram obtidos dois índices para cada indicador de exposição (à exceção do indicador de Componente social) relativos aos períodos de retorno de 10 e 50 anos. As classificações representadas correspondem à informação do respetivo indicador de exposição que correspondem ao valor de importância que foi utilizado para a determinação do índice de Uso do Solo ( $i_{US}$ ) segundo a equação 19.



Figura 5.17 Classificação da interseção entre o indicador de exposição de Uso do Solo e a zona de buffer de extensão de erosão (1), e as zonas de buffer de extensão de galgamento para período de retorno de 10 (2a) e 50 anos (2b).

Os valores de índice de Uso do Solo ( $i_{US}$ ) foram reclassificados adequadamente numa escala entre 1 e 5, e os resultados são apresentados na Figura 5.18. Para erosão, o índice de Uso do Solo apresenta uma classificação de bastante a elevada relevância para praticamente toda a extensão da Península do Ancão. Na Ilha da Barreta este índice é classificado de relevante ou com bastante relevância ao longo da zona oriental, principalmente, nas seções no Cabo de Santa Maria e a oeste do mesmo, assim como, nas seções na extremidade nascente da zona oriental. Ao longo de praticamente toda a Ilha da Culatra, este índice tem classificação de relevante e apenas numa seção da extremidade poente da zona ocidental tem classificação de bastante relevante. A Ilha da Armona apresenta uma representação semelhante à da Culatra, onde praticamente todas as seções apresentam classificação de relevante, à exceção de algumas seções na extremidade poente da zona ocidental e na área da concessão da praia da Fuseta, que apresentam classificação de bastante relevante ou de elevada relevância. Para galgamento, o padrão de distribuição do índice de uso de solo é idêntico entre PR 10 e 50 anos, evidenciando-se o aumento de classificação em algumas seções. Assim, as seções que se destacam como, relevantes a de elevada relevância, correspondem à zona central e parte da zona oriental da Península do Ancão; às seções no Cabo de Santa Maria e a Oeste do mesmo, à extremidade nascente da zona ocidental e extremidade nascente da zona oriental

da Ilha da Barreta; à extremidade nascente da zona oriental da Ilha da Culatra; e à extremidade poente da zona ocidental e às seções localizadas na concessão da praia da Fuseta na Ilha da Armona.

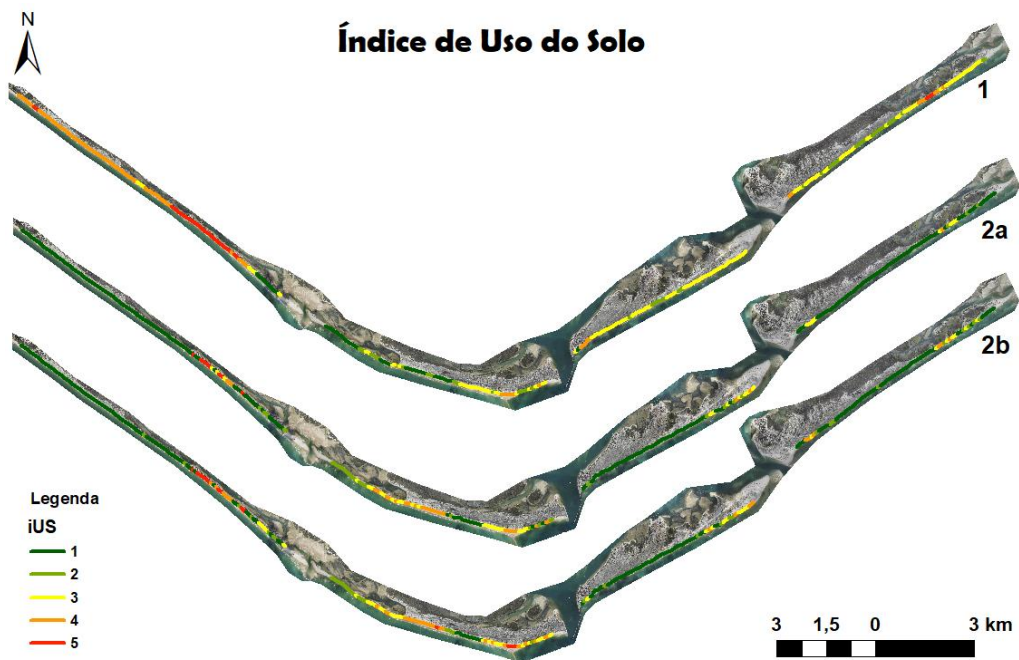


Figura 5.18 Índices de Uso do Solo ( $i_{US}$ ) para Erosão (1) e Galgamento (2a – período retorno 10 anos e 2b – período de retorno 50 anos).

### 5.3.4.2 Atividade Comercial ( $i_{AC}$ )

A representação espacial das áreas de atividade comercial na zona em estudo é apresentada na Figura 5.19, com realce de uma zona da Praia de Faro.

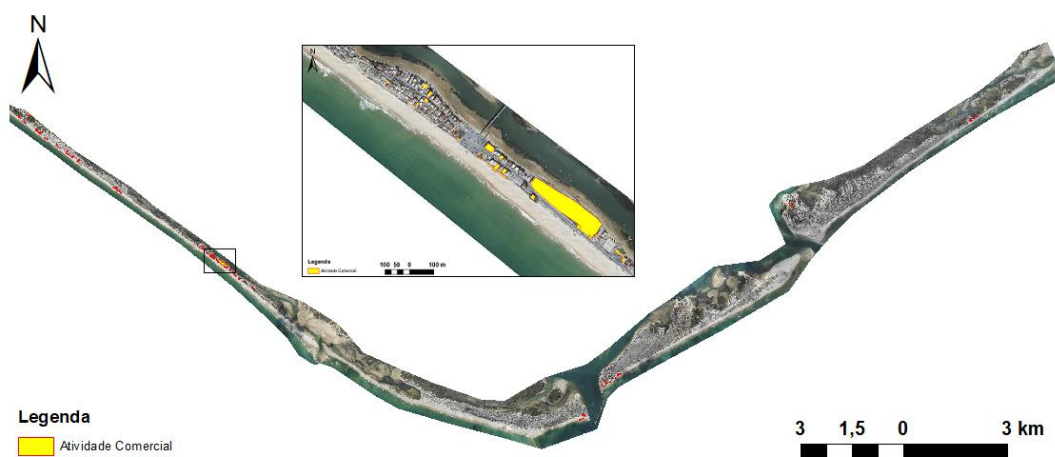


Figura 5.19 Representação espacial do indicador de Atividade Comercial.

Após a obtenção das interseções entre o indicador de exposição de atividade comercial e as zonas buffer de erosão e galgamento, foram determinados os valores utilizados para a classificação do índice de Atividade Comercial ( $i_{AC}$ ) (Figura 5.20). Como seria expetável, as seções que se destacam com valores relevantes ou de elevada relevância correspondem às seções na extremidade poente da zona ocidental e na zona central, da Península do Ancão, e na extremidade poente da zona ocidental da Ilha da Culatra, tanto para erosão como para galgamento.

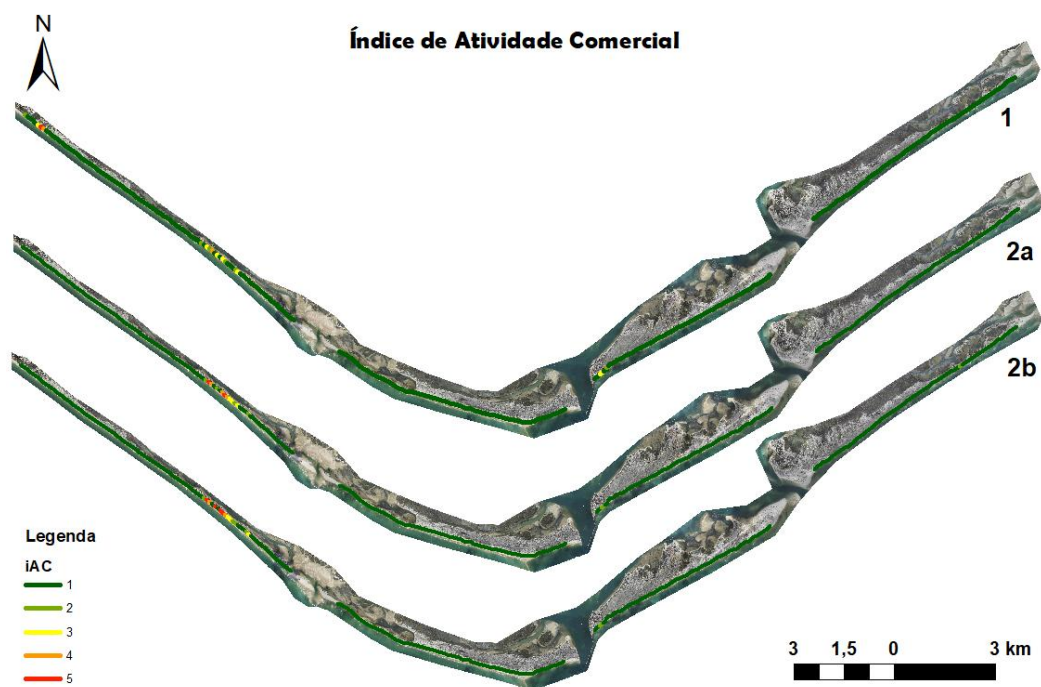


Figura 5.20 Índices de Atividade Comercial ( $i_{AC}$ ) para Erosão (1) e Galgamento (2a – período retorno 10 anos e 2b – período de retorno 50 anos).

### 5.3.4.3 Redes de Transporte e Acessos Públicos ( $i_{RTAP}$ )

A rede de transportes e acessos públicos foi representada espacialmente e os resultados podem ser observados na Figura 5.21, onde se sobressai uma área da Praia de Faro.



Figura 5.21 Representação espacial do indicador de Rede de Transportes e Acessos Públicos.

Com a avaliação direta de cada secção, com base nos resultados das interseções entre o indicador de exposição de rede de transportes e acessos públicos e as zonas buffer de erosão e galgamento, foi definido o respetivo índice (Figura 5.22). Para este índice foram apenas verificadas secções com classificação de relevante na zona central da Península do Ancão, nomeadamente, na zona da praia de Faro, tanto para erosão como para galgamento.

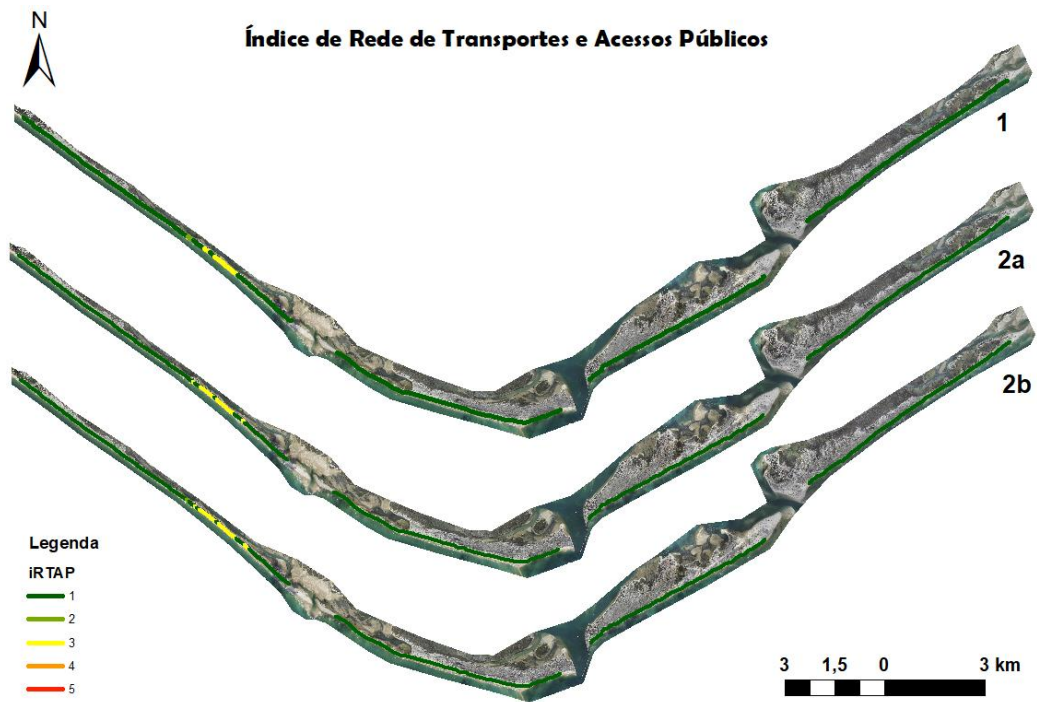


Figura 5.22 Índices de Rede de Transportes e Acessos Públicos ( $i_{RTAP}$ ) para Erosão (1) e Galgamento (2a – período retorno 10 anos e 2b – período de retorno 50 anos).

#### 5.3.4.4 Serviços de Utilidade Pública ( $i_{SUP}$ )

A representação espacial dos serviços de utilidade pública é idêntica à do indicador anterior e pode ser observada na Figura 5.23, com uma área da Praia de Faro em realce.

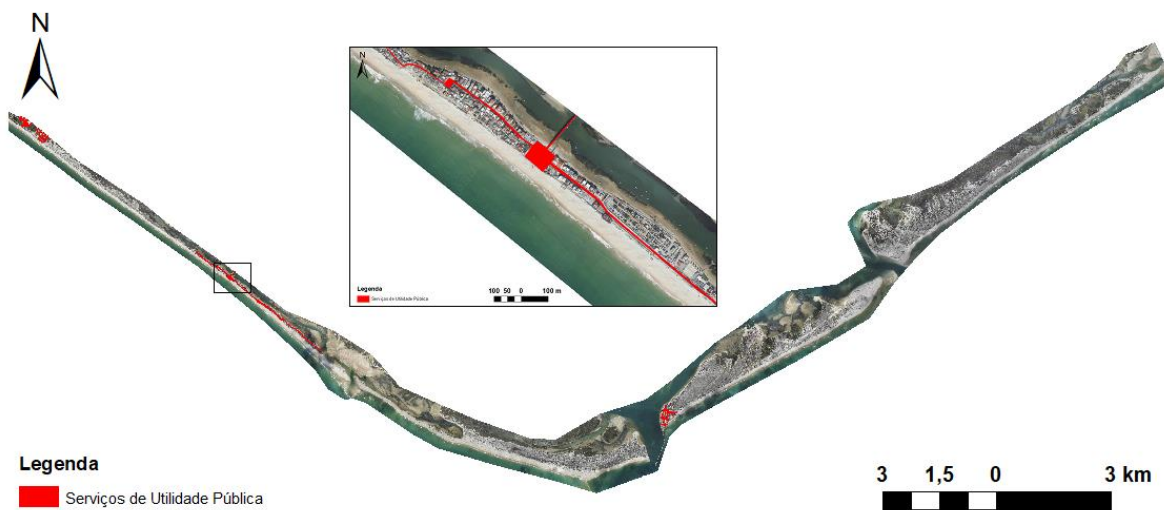


Figura 5.23 Representação espacial do indicador de Utilidade Pública.

Com base nos resultados das interseções entre o indicador de exposição de serviços de utilidade pública e as zonas buffer de erosão e galgamento, foi realizada a avaliação direta de cada secção a partir da qual foi definido o respetivo índice (Figura 5.22). Para este índice foram apenas verificadas secções com classificação de média relevância na zona central da Península do Ancão, nomeadamente, na zona da praia de Faro, tanto para erosão como para galgamento.

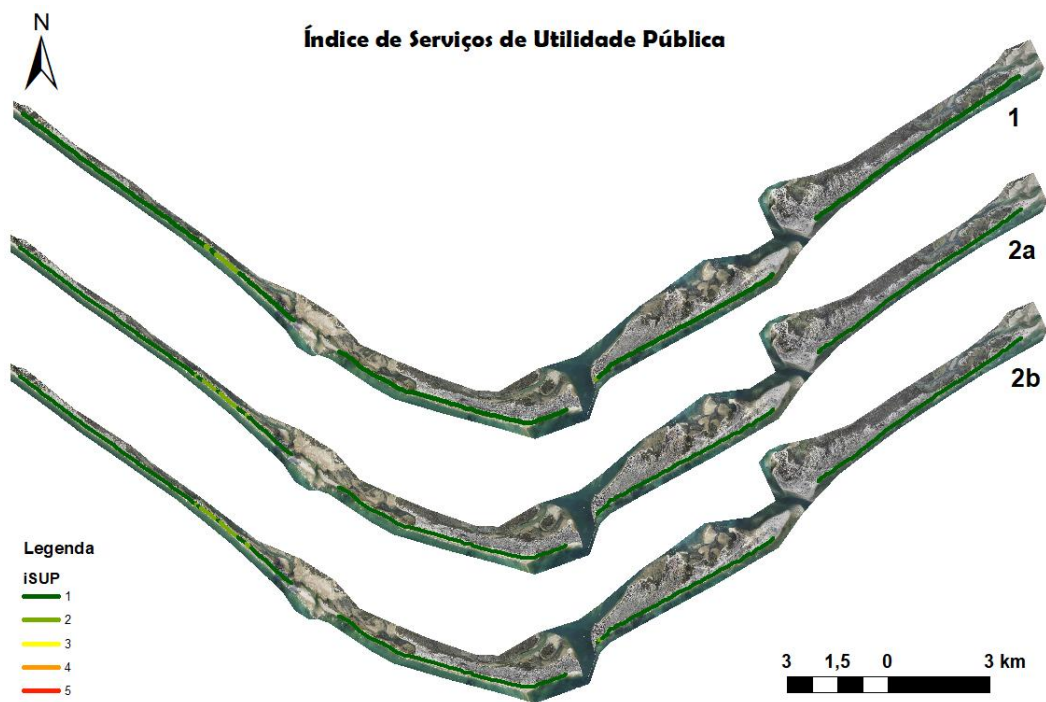


Figura 5.24 Índices de Serviços de Utilidade Pública ( $i_{SUP}$ ) para Erosão (1) e Galgamento (2a – período retorno 10 anos e 2b – período de retorno 50 anos).

### 5.3.4.5 Componente Social ( $i_{CS}$ )

A representação espacial do indicador de componente social é evidenciada na Figura 5.25, com destaque de uma área da Praia de Faro.

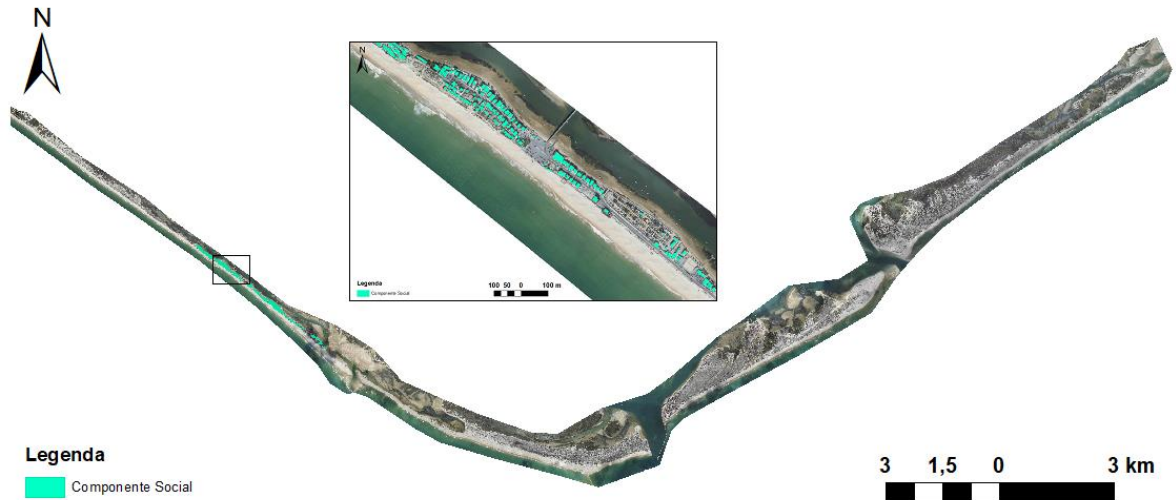


Figura 5.25 Representação espacial do indicador de Componente Social.

Segundo os resultados obtidos da análise estatística dos dados de ocupação nas áreas urbanas localizadas na zona externa das barreiras (Praia de Faro e comunidade do Farol) em estudo e influenciadas diretamente pela ação das tempestades marítimas foi atingido o valor do índice de Componente Social ( $i_{CS}$ ) (Figura 5.26). De referir que os valores obtidos para o índice de componente social foram os mesmos tanto para erosão como para galgamento. Para praticamente toda a extensão da zona central da Península do Ancão, foi verificada classificações entre relevante a de elevada relevância. Ainda na Península do Ancão foram apenas verificadas seções com classificação de média relevância a relevante na extremidade poente da zona oriental.

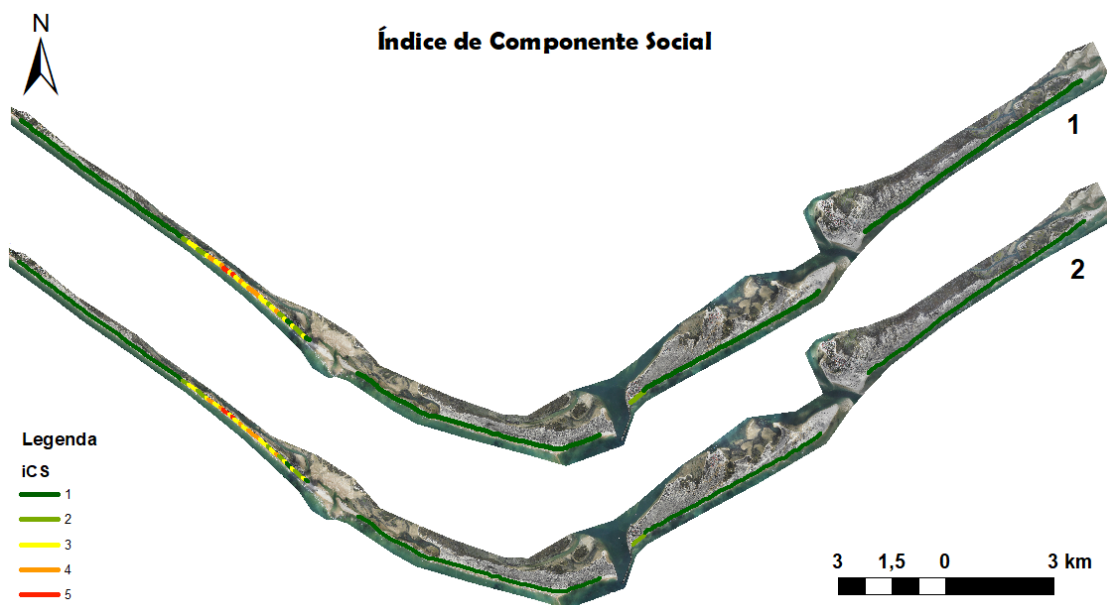


Figura 5.26 Índices de Componente Social ( $i_{CS}$ ) para Erosão (1) e Galgamento (2).

### 5.3.5 ÍNDICES COSTEIROS DE EROSÃO E GALGAMENTO

Os índices costeiros de erosão e galgamento instigados por tempestades com período de retorno de 10 e 50 anos, obtidos individualmente para cada secção de 100 m ao longo da Península do Ancão e Ilhas da Barreta, Culatra e Armona, estão demonstrados nas Figuras 5.27, 5.28, 5.30 e 5.31.

O padrão de distribuição do IC de erosão para PR 10 anos (Figura 5.27) ao longo da zona de estudo é similar, com valores de IC baixos ou inferiores, com exceção, na zona central da Península do Ancão, onde se verificam várias secções com valores de IC médios e uma (secção 68 localizada no parque de estacionamento à entrada da Praia de Faro) com valor elevado, assim como, na Ilha da Armona, na zona de concessão da Praia da Fuzeta, onde se verificam valores de IC médios. A distribuição do IC de erosão para PR 50 anos (Figura 5.28) é semelhante à de para PR de 10 anos, contudo, praticamente toda a zona ocidental e central da Península do Ancão passam a índices médios e verifica-se o aumento de secções com índice elevado (secções 68 e 69 – localizadas no parque de estacionamento à entrada da Praia de

Faro, 72 e 74 – localizadas na área do parque de campismo) na zona central da Península do Ancão. Assim, é claramente identificada a zona central da Península do Ancão como um *hotspot*.



Figura 5.27 Índice Costeiro de Erosão induzido por tempestades com período de retorno de 10 anos na Península do Ancão e Ilhas da Barreta, Culatra e Armona.



Figura 5.28 Índice Costeiro de Erosão induzido por tempestades com período de retorno de 50 anos na Península do Ancão e Ilhas da Barreta, Culatra e Armona.

O padrão de distribuição do IC de galgamento para PR 10 anos (Figura 5.30) ao longo da zona de estudo é, maioritariamente, com índices médios ou inferiores, à exceção a uma seção na zona central da Península do Ancão, com índice elevado. Esta corresponde à seção 69, localizada no parque de estacionamento da entrada da Praia de Faro. Para PR 50 anos (Figura

5.31) o padrão mantém-se similar ao IC de galgamento para 10 anos, contudo, verificando-se um agravamento do índice em especial na zona central da Península do Ancão, aumentando o número de seções com índice médio e o aparecimento de mais uma seção com índice elevado (seção 75 – localizada em frente ao Centro Náutico; Figura 5.29). Colocando em evidência a zona central da Península do Ancão e destacando-se a mesma como um *hotspot*.

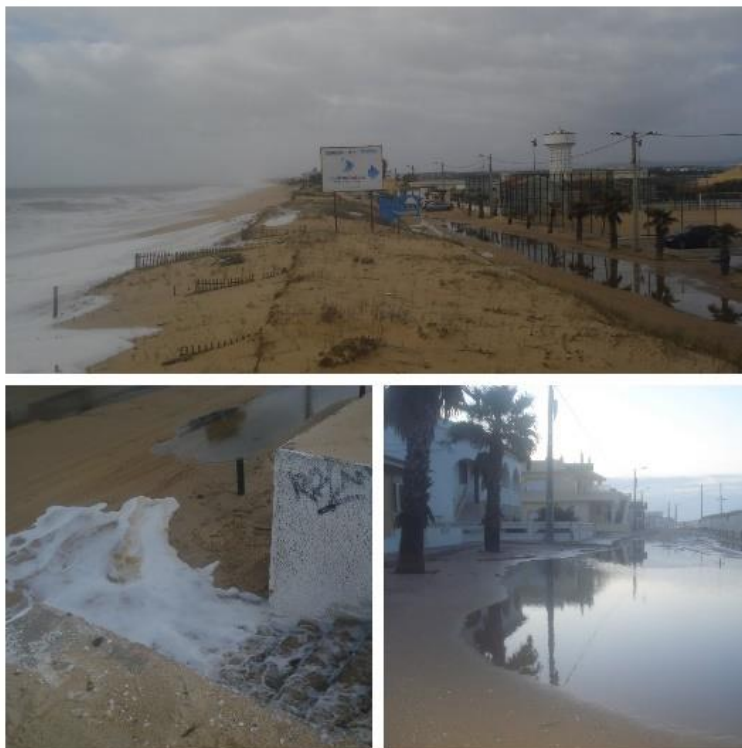


Figura 5.29 Ocorrência de galgamentos consequentes de tempestade em 2011 na Praia de Faro.



Figura 5.30 Índice Costeiro de Galgamento induzido por tempestades com período de retorno de 10 anos na Península do Ancão e Ilhas da Barreta, Culatra e Armona.



Figura 5.31 Índice Costeiro de Galgamento induzido por tempestades com período de retorno de 50 anos na Península do Ancão e Ilhas da Barreta, Culatra e Armona.

## 5.4. Discussão

Da análise dos índices de perigo de erosão para períodos de retorno de 10 e 50 anos ressalta que as barreiras do flanco ocidental (Península do Ancão e Ilha da Barreta) estão bem caracterizadas em termos de perigosidade a erosão. Resultados semelhantes foram obtidos por Ferreira *et al.* (2106b), com exceção relativamente à Ilha da Armona.

Praticamente toda a extensão da Península do Ancão está sujeita a erosão, tanto para 10 como para 50 anos de período de retorno, à exceção da zona oriental, zona esta identificada como em recuperação dunar com bermas superiores a 20 m. A zona central da Península do Ancão é a zona evidenciada com a maior perigosidade a erosão desta barreira. O que é dedutível, sabendo-se que ao longo desta zona densamente urbanizada a existência de berma de praia é praticamente inexistente ou reduzida, e acumulado ao facto de toda esta zona ocupar a linha de duna frontal.

A zona ocidental da Ilha da Barreta está completamente sob o impacto de erosão. Esta zona é considerada, de acordo com Matias *et al.* (2008), como uma zona dominada pelos fenómenos de erosão a jusante da Barra do Ancão, resultantes das migrações da própria barra. O que influencia diretamente o desenvolvimento de cotas reduzidas nesta zona e, conseqüentemente, induz à potencial ocorrência de erosão ao longo de toda a extensão desta zona costeira. Na zona oriental da Ilha da Barreta, considerada como uma zona estável e de acumulação devido à fixação do molho ocidental da Barra de Faro-Olhão (Matias *et al.*, 2008), verificou-se sobrestimação do perigo a erosão na extremidade nascente, fundamentada pelo método de definição dos parâmetros morfológicos utilizados no presente trabalho. Nomeadamente, ao ser considerado a duna frontal (pré-duna) desta zona, como base para definição da primeira linha de atuação de erosão, a extensão de berma e altura de duna diminuíram, o que se considera como razão determinante de influência dos resultados aqui obtidos. Assim, assume-se a importância de adequar melhor este procedimento para obtenção de resultados mais precisos nesta zona e em zonas de carácter morfológico semelhante.

Apesar da assertividade relativamente adequada na maioria dos resultados obtidos no flanco ocidental, no flanco oriental verificou-se alguma sobrestimação de perigosidade a erosão na zona oriental da Ilha da Culatra e em toda a extensão da Ilha da Armona, principalmente para

PR 50 anos. Resultados obtidos com bastante similaridade por Mon (2020). Acredita-se que a razão por detrás desta sobrestimação nos resultados do presente trabalho esteja relacionada, mais uma vez, com os critérios de definição dos parâmetros morfológicos, em particular a duna frontal.

Contudo, na zona oriental da Ilha da Culatra e nas seções correspondentes à antiga “comunidade” da praia da Fuseta, na Ilha da Armona, foram registadas ocorrências de erosão relevantes derivadas da ação de tempestades (Figura 5.32). Os acontecimentos de erosão de diversas casas de veraneio na praia da Fuseta vieram antecipar as ações de remoção das mesmas, já definidas anteriormente à tempestade, no âmbito do programa Polis Litoral Ria Formosa, pelo conhecimento que já se detinha relativamente à perigosidade que toda esta zona apresentava a erosão.

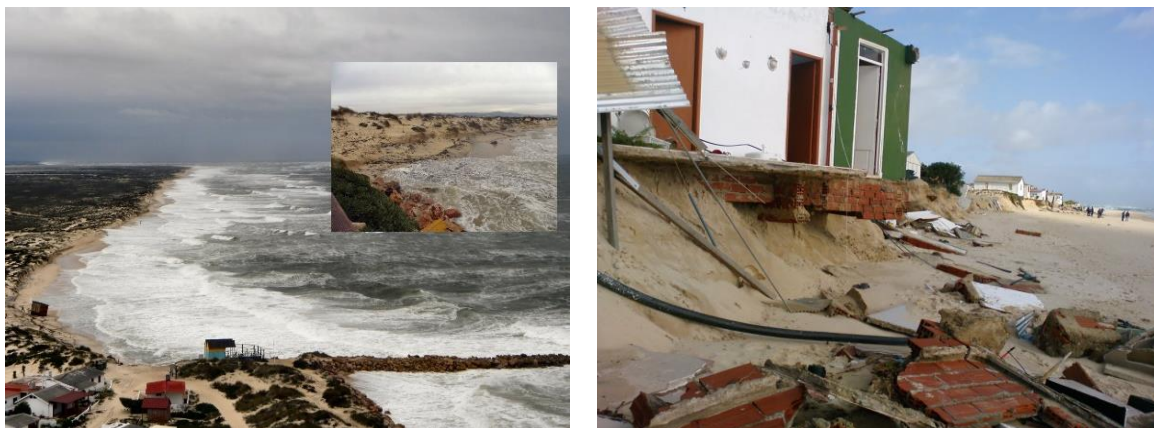


Figura 5.32 Ocorrências de erosão derivadas de tempestades em 2011 na Ilha da Culatra (à esquerda) e em 2009 na antiga “comunidade” da praia da Fuseta na Ilha da Armona (à direita).

Por outro lado, a tempestade Emma que atingiu a zona de estudo desde 28 de fevereiro a 3 de março de 2018, apesar de ter sido uma tempestade com orientação de SO teve maior impacto erosivo no flanco oriental comparativamente ao flanco ocidental da Ria Formosa (Garzon *et al.*, 2021).

Os índices de perigo de galgamento para períodos de retorno de 10 e 50 anos, representam adequadamente a perigosidade a galgamento para a maioria das seções da zona de estudo. Contudo, verificam-se sobrestimações com maior relevância para PR 50 anos, na extremidade poente da zona oriental da Península do Ancão, na zona do Cabo de Santa Maria, assim como, na extremidade nascente da zona oriental da Ilha da Barreta, na extremidade

nascente da zona oriental da Ilha da Culatra e na extremidade poente da zona ocidental da Ilha da Armona. Resultados idênticos foram obtidos por Mon (2020).

Na Península do Ancão as seções com maior perigo a galgamento correspondem às zonas urbanizadas, ao longo de praticamente para toda a extensão da zona central, em particular no local do estacionamento à entrada da praia de Faro, onde a duna frontal é inexistente e substituída por estruturas urbanas, assim como, onde a largura de berma é reduzida ou ausente. Na zona oriental, a seção localizada na zona de reabertura da Barra do Ancão é assinalada também com perigo a galgamento, visto que as cotas dunares diminuem consideravelmente neste local relativamente às seções adjacentes. A restinga arenosa que se desenvolve ao longo da zona ocidental da Ilha da Barreta apresenta bastante perigosidade a galgamento por ser praticamente desprovida de um sistema dunar.

Na zona oriental da Ilha da Barreta também se verifica perigo a galgamento bastante considerável, contudo esta zona é revestida por um sistema dunar robusto o que lhe confere proteção. Aqui, de novo, acredita-se que esta sobrestimação advenha do procedimento utilizado no presente estudo para definição dos parâmetros morfológicos, nomeadamente da duna frontal. Apesar dos resultados obtidos, esta ilha é inabitada e apresenta pouca atividade humana, visto que só existe um estabelecimento de restauração na zona oriental, e assim, o risco que apresenta é apenas para com o ecossistema e as espécies de aves protegidas aí existentes.

Na Ilha da Culatra, o elevado perigo a galgamento em toda a extensão da zona ocidental é efetivamente recorrente e deve-se às suas cotas baixas, como também comprovado por Matias *et al.* (2010). Por outro lado, na zona oriental a sobrestimação do perigo a galgamento está relacionada novamente à definição da duna frontal, como explicado anteriormente para o perigo a erosão na mesma zona.

Na zona oriental da Ilha da Armona, nas seções onde se verifica perigosidade a galgamento correspondem à antiga “comunidade” da praia da Fuseta, onde, como já referido anteriormente (*cf.* Capítulo 2), se localizava a antiga Barra da Fuseta. Esta zona sofreu em março de 2010 ocorrência de galgamentos e rutura total da barreira numa extensão de 100 m (Figura 5.33). Após estes acontecimentos, e como já definido no âmbito do programa Polis,

esta zona foi requalificada. As ações de realimentação contribuíram para o aumento da elevação em toda esta zona. Os parâmetros morfológicos utilizados neste trabalho, obtidos a partir do LiDAR 2009 ainda não refletem as mudanças resultantes dessas intervenções, daí a perigosidade a galgamento obtidas no presente trabalho para esta zona.



Figura 5.33 Episódio de galgamento com rutura da barreira na Praia da Fuseta, na Ilha da Armona, registado em vídeo por Ricardo Badalo “Passeios da Ria Formosa” no dia 2 de março de 2010.

Segundo os resultados obtidos por Sedrati *et al.* (2011) os principais eventos de galgamento não coincidem com a ocorrência dos máximos de altura significativa da onda ao largo, o qual foi justificado pelo facto de níveis de *run-up* elevados não serem originados necessariamente por alturas de onda elevadas. Os mesmos autores aferiram ainda que as ocorrências de galgamento estão mais relacionadas com os níveis de *storm surge* (durante preia-mar de sizígia) do que com a energia e duração de tempestades. Assim, no presente estudo os parâmetros das tempestades considerados para análise corresponderam aqueles que ocorreram no momento em que se verificou o pico máximo de nível do mar dentro do período definido para cada tempestade identificada. Este valor, nem sempre coincidiu com o valor de altura de onda mais elevado observado dentro da mesma tempestade, contudo considerou-se representativo do pior cenário.

A identificação de áreas potencialmente sujeitas a risco costeiro de erosão e galgamento derivado de tempestades marítimas, ao longo do sistema de barreiras arenosas em estudo, foi alcançado. Apesar de se verificar similaridade no padrão de distribuição de perigosidade a

erosão como galgamento, entre os resultados obtidos no presente trabalho e os obtidos por Mon (2020) e Ferreira, *et al.* (2016b), foram verificadas algumas diferenças em termos de magnitude, que estarão fortemente relacionadas com o facto dos parâmetros morfológicos terem sido obtidos de fontes diferentes, visto que, os trabalhos dos autores referidos utilizaram o LiDAR 2011 ao invés do LiDAR 2009, assim como, à metodologia empregue para definição da duna frontal. Por outro lado, a diferença dos métodos utilizados para tratamento dos dados de onda, assim como, da fonte dos dados de nível de maré, poderá ter implicação na divergência entre os resultados obtidos neste trabalho e os dos autores mencionados.

Através da relação dos índices de perigo com os índices de exposição obtiveram-se os índices costeiros (IC). Na generalidade, a zona em estudo é caracterizada por IC de erosão e galgamento médios a baixos, com exceção a zona central da Península do Ancão, realçando esta como *hotspot* tanto para erosão como para galgamento para tempestades com PR 10 e 50 anos. Os IC ao serem obtidos para cada seção de 100 m ao longo da zona em estudo, permitiu uma análise bem detalhada especificando as seções do parque de estacionamento à entrada da praia de Faro, assim como, as seções em frente ao parque de campismo e ao centro náutico da praia de Faro como *hotspot* específicos, tanto para erosão como para galgamento.

As áreas urbanas desenvolvidas ao longo do sistema de ilhas e penínsulas barreira da Ria Formosa são relativamente reduzidas e correspondem a pequenas vilas localizadas na maioria na zona interior das barreiras. Contudo, em particular nas barreiras em estudo, as áreas urbanas da Praia de Faro (Península do Ancão) e do Farol (Ilha da Culatra) expandiram-se da duna frontal em direção ao mar estando sujeitas aos impactos diretos das tempestades (Ferreira *et al.*, 2016b). Como, a zona do Farol não foi considerada para análise, pois para além de ser uma área artificializada por enrocamento, a propagação das ondas nesta área é fortemente influenciada pelo molhe da Barra de Faro-Olhão, apenas a zona ocupada da Praia de Faro, contabilizou com índices de exposição mais acentuados, e conseqüentemente toda a restante zona em estudo refletiu índices costeiros reduzidos tanto para erosão como para galgamento devido à exposição limitada.

A avaliação de risco costeiro é eminente e cada vez mais uma necessidade a implementar em qualquer zona costeira de forma permanente e regular. Daí o uso de abordagens

metodológicas relativamente simples, acessíveis e de rápida aplicação a nível regional são essenciais, como mostrou ser a abordagem utilizada no presente trabalho – CRAF1, para a identificação de *hotspots* ao longo das barreiras arenosas em estudo. Esta abordagem ressaltou como *hotspots* áreas já conhecidas como problemáticas aquando expostas sob eventos de tempestades severas. Assim, após a identificação destes *hotspots*, obtém-se de certa forma uma confirmação em como estas áreas correspondem a zonas costeiras onde ações de mitigação de risco costeiro são necessárias e urgentes, e requerem monitorização e vigilância permanente. A aplicação deste tipo de abordagens de forma regular em sistemas naturais sem qualquer tipo de proteção costeira, como é o caso do sistema de ilhas e penínsulas barreiras da Ria Formosa, é essencial de forma à implementação de medidas de redução de risco costeiro. A aplicação regular destas abordagens é fundamentada pelas modificações regulares observadas na morfologia costeira que influenciam a ação das ondas, pela reação das barreiras aos impactos das tempestades, assim como, pelas alterações costeiras impostas pelo aumento do nível do mar e pelas alterações climáticas.

Para além da importância que apresenta para a preservação do habitat local da Ria Formosa, a implementação de estudos idênticos ao do presente estudo são essenciais para identificação e avaliação das zonas de maior risco e, com os resultados resultantes, procurar identificar medidas de ação para garantir a proteção da população e conservação do sistema natural.

## **5.5. Conclusões**

A quase totalidade da extensão das barreiras arenosas em estudo é caracterizada por Índices Costeiros de erosão e galgamento médios a baixos, com exceção da zona central da Península do Ancão, sendo esta identificada como *hotspot* tanto para erosão como para galgamento para tempestades com períodos de retorno de 10 e 50 anos.

A metodologia CRAF1 empregue no presente estudo para a determinação de índices costeiros de erosão e galgamento demonstrou ser eficiente pois permitiu a identificação de *hotspots* e consequente reconhecimento dos mesmos como áreas onde ações de mitigação são necessárias e urgentes para redução de risco. Por outro lado, também provou ser eficiente na deteção de áreas que já eram reconhecidas como áreas problemáticas e que, inclusive, após a aplicação deste estudo sofreram episódios de erosão e galgamento, como foi referido

na área da “antiga” praia da Fuseta na Ilha da Armona e na zona central da Península do Ancão. A empregabilidade deste método é considerada relativamente acessível e de fácil utilização, contudo exige a existência de uma base de dados ampla com informação detalhada.

As sobrestimativas obtidas, em especial para erosão nas ilhas do flanco oriental e para galgamento na zona oriental da Ilha da Barreta e na extremidade nascente da zona oriental da Ilha da Culatra estão relacionadas com o processo de aquisição dos dados morfológicos, nomeadamente, na definição da primeira linha de atuação, considerada como a duna frontal (pré-duna). No caso específico das sobrestimativas obtidas para as seções na “antiga” Praia da Fuseta da Ilha da Armona, estas estão relacionadas com o facto de os dados morfológicos utilizados no presente trabalho ainda não considerarem as cotas mais elevadas resultantes das intervenções de requalificação dessa zona. Assim, apesar dos resultados obtidos no presente trabalho serem representativos e confiáveis, estas sobrestimativas poderão ser atenuadas através de um ajuste e atualização dos dados de entrada.

A obtenção dos parâmetros de profundidade e extensão de galgamento é uma mais-valias para a determinação do impacto de galgamento com maior precisão em áreas costeiras. A abordagem utilizada para a determinação de extensão e profundidade de galgamento, segundo a adaptação das formulações de Donnelly (2008) por Plomaritis *et al.* (2015), mostrou ser uma metodologia prática e eficiente, pelos resultados precisos obtidos para a zona em estudo, assim como, acessível, por necessitar de dados de entrada de relativamente fácil acesso.

Os índices costeiros obtidos para tempestades com período de retorno de 50 anos são 2 vezes superiores aos de PR 10 anos, para os níveis médios a muito elevados ( $\geq 3$ ), tanto para erosão como para galgamento. Por outro lado, também foi observado que os valores dos índices de erosão são elevados para as ilhas do flanco oriental (Ilhas da Culatra e Armona), apesar das tempestades de E-SE possuírem menor magnitude comparativamente às tempestades de O-SO atuantes no flanco ocidental. Tal poderá estar relacionado com as diferenças morfológicas e conseqüente menor resistência a tempestades do flanco oriental. Será necessário realizar mais estudos de forma a melhor analisar esta situação e melhor compreender os motivos específicos para esta diferença de comportamento.

## 6. CONCLUSÕES GERAIS

A complexidade que envolve todo o sistema lagunar da Ria Formosa é fascinante. Engloba uma diversidade de processos de desenvolvimento e evolução naturais. É um sistema que aparenta ser estático a nível global, mas a uma menor escala comporta-se de forma bastante dinâmica para que seja possível manter o equilíbrio que lhe oferece essa sua aparente estabilidade global.

São notáveis os desequilíbrios nos processos hidrodinâmicos característicos deste sistema derivados de ações antrópicas e a sua adaptação a novas condições. É preocupante que a ocupação antrópica ao longo deste sistema de ilhas-barreira ocorra frequentemente de forma desorganizada sobre o cordão dunar frontal, o que traz consequências visíveis para estas zonas consideradas vulneráveis, que terão tendência para se agravar, devido à aceleração da subida do nível médio do mar.

Devido à extrema complexidade do sistema lagunar da Ria Formosa, que envolve tão diversos processos, é evidente a dificuldade em qualificar e quantificar a resiliência deste meio a intempéries. Logo, é importante ter conhecimento das zonas de perigo permanente, vulneráveis a erosão e galgamento quando expostas a temporais, de forma a evitar a sua ocupação ou a tomar medidas de prevenção de impactos em zonas ocupadas.

Apesar dos diversos estudos existentes relacionados com vulnerabilidade costeira na zona de estudo, o presente trabalho apresenta uma perspetiva inovativa, recentemente abordada noutros estudos de carácter similar e cada vez mais empregue, no cálculo do potencial de erosão e galgamento, que consiste na integração e consideração de todos os parâmetros fulcrais obtendo índices de vulnerabilidade costeira a tempestades associadas a períodos de retorno multi-paramétricos. As áreas mais potencialmente vulneráveis (“*hotspots*”) foram facilmente identificadas, através da análise da distribuição espacial da magnitude do impacto expectável, as quais foram coincidentes com zonas realmente conhecidas como problemáticas, onde acontecimentos erosivos e de galgamento são decorrentes, como é o caso da zona central da Praia de Faro.

O cálculo da vulnerabilidade a erosão e galgamento costeiro, associada a períodos de retorno baseados na resposta, ao invés de períodos de retorno baseados num evento de tempestade com parâmetros únicos é notavelmente relevante e essencial em estudos futuros. Para tal, é necessário adotar uma abordagem probabilística, onde é estimada a probabilidade conjunta da ocorrência de perigos (erosão ou galgamento) induzidos ao longo da costa, face aos parâmetros forçadores hidrodinâmicos e aos parâmetros recetores morfológicos. Neste trabalho foram determinadas as consequências associadas a níveis de *run-up* máximos ( $R_{high}$ ) com períodos de retorno de 5, 25 e 50 anos para 6 diferentes classes de pendor de face de praia tanto para condições de O-SO como de E-SE tendo por base esta análise baseada na resposta (*response approach*).

A configuração geomorfológica do sistema de ilhas e penínsulas barreira da Ria Formosa, onde se enquadra a zona em estudo, contribui por si só para comportamentos diferentes em termos de resposta dos flancos ocidental e oriental devido à diferenciação de exposição à atuação da agitação marítima. Os processos de refração e difração das ondas, derivados da forma cúspide que este sistema apresenta, assumem um papel importante na propagação da agitação incidente nas áreas consideradas em estudo. A individualização na análise utilizada neste trabalho entre condições de agitação de Oeste-Sudoeste (O-SO) e de Este-Sudeste (E-SE) para aplicação específica nos cálculos de níveis de *run-up* máximos ( $R_{high}$ ) no flanco ocidental (Península do Ancão e Ilha da Barreta) e no flanco oriental (Ilhas da Culatra e Armona), respetivamente, foi essencial para minimizar possíveis influências destes processos nos resultados e, por outro lado, para evidenciar as consequências de tempestades resultantes de agitação marítima com maior influência em cada flanco.

A utilização da abordagem de *Sallenger* na previsão dos regimes de colisão e galgamento ao longo da zona em estudo mostrou limitações, com maior evidência em seções onde as larguras de berma e de face de duna são bem desenvolvidas. Estas limitações nas previsões de colisão e galgamento foram bem mais evidente nas ilhas do flanco ocidental (Península do Ancão e Ilha da Barreta), sobretudo na Ilha da Barreta, do que nas ilhas do flanco oriental (Ilhas da Culatra e Armona). Assumindo a notável influência das larguras de berma e de face de duna nas previsões dos regimes de colisão e galgamento foi possível apresentar uma adaptação à abordagem de *Sallenger* através da incorporação dos *thresholds* de colisão e

galgamento. Nas ilhas do flanco ocidental a utilização dos *thresholds* de colisão e de galgamento, para definição de secções onde a aplicabilidade da abordagem de *Sallenger* para previsão dos regimes de colisão e galgamento tem limitações, foi marcadamente proveitosa. Nas ilhas do flanco oriental as previsões de galgamento coincidiram bastante com as observações morfológicas, contrariamente ao verificado com as previsões de colisão. Por outro lado, a utilidade dos *thresholds* de colisão e de galgamento como justificação dos casos de erro obtidos nas ilhas do flanco oriental não foi satisfatória. Uma vez que, na maioria das secções correspondentes a casos de erro, as larguras de berma e berma + duna são inferiores aos *thresholds* de colisão e galgamento. Assim, para as ilhas do flanco oriental é evidente que existem outros fatores influentes nas previsões dos regimes de colisão e galgamento para além do desenvolvimento de larguras de berma e de face de duna.

A dificuldade de justificação de algumas previsões erróneas obtidas no presente estudo sugere a necessidade de atenção para a consideração em estudos futuros de outros fatores influentes nas previsões dos regimes de colisão e galgamento. Neste seguimento, será importante procurar definir uma abordagem que identifique padrões de resposta através de relações observadas entre variações quantitativas no perfil de praia (*e.g.* do recuo máximo de praia) com variações de elevação específicas e determinantes no perfil de praia (*e.g.* base e topo de duna e crista da berma), assim como, a incorporação de outros parâmetros (*e.g.* batimetria, barras submersas e vegetação ao longo do perfil de praia) na determinação dos níveis máximos de atuação do mar.

Apesar de não se ter contabilizado para análise no presente trabalho parte das extremidades das barreiras em estudo, devido à influência dos deltas de vazante das Barras do Ancão, da Armona e da Fuseta e dos molhes da Barra de Faro-Olhão na propagação das ondas, a maioria das ocorrências de galgamento foram previstas em zonas dentro das áreas de perigo associado às barras de maré da Ria Formosa, definidas por Vila-Concejo *et al.* (2006b), e coincidiram com secções com larguras de berma + face de duna pouco desenvolvidas. A exceção foi a Península do Ancão, onde a ocorrência de galgamentos esteve associada à zona central densamente urbanizada, também caracterizada por larguras de berma pouco desenvolvidas e larguras de face de duna bastante reduzidas e, em alguns casos, inexistentes.

O método utilizado neste trabalho para a determinação de vulnerabilidade a colisão e galgamento nos sistemas barreira em estudo demonstrou produzir resultados muito aceitáveis. Tal foi evidenciado pelo facto de terem sido notáveis as correspondências entre as seções vulneráveis a colisão e a galgamento previstas no presente estudo e as zonas efetivamente conhecidas como vulneráveis na zona em estudo, onde são recorrentes episódios de erosão e galgamento e dos quais existem registos das suas ocorrências. Porém, é de ter em conta que as previsões foram obtidas com base em dados topográficos extraídos de Modelos Digitais de Terreno dos levantamentos LiDAR 2009, e dado o forte dinamismo característico dos sistemas de praias, ocorrem variações rápidas e distintas nas morfologias de praia e duna ao longo do tempo, quer em função do equilíbrio do próprio sistema, quer por condições de tempestade ou mesmo por fatores antrópicos. Assim, a incorporação e atualização de dados topográficos de forma periódica pode melhorar a precisão das previsões.

Relativamente à análise dos Índices Costeiros de erosão e galgamento ao longo da zona em estudo, praticamente toda a extensão das barreiras arenosas é caracterizada por índices médios a baixos, com exceção da zona central da Península do Ancão. Esta zona foi identificada como *hotspot* tanto para erosão como para galgamento para tempestades com períodos de retorno de 10 e 50 anos.

O método CRAF1 utilizado no presente trabalho na determinação dos índices costeiros de erosão e galgamento foi considerado eficaz, permitindo a identificação de *hotspots* e definição de áreas onde ações de mitigação são necessárias e urgentes para redução de risco. Por outro lado, este método também provou ser competente na deteção de áreas anteriormente reconhecidas como áreas problemáticas e que, inclusive, após a realização deste estudo sofreram episódios de erosão e galgamento, como foi o caso da “antiga” praia da Fuseta na Ilha da Armona e da zona central da Península do Ancão. Este método é considerado de fácil utilização e relativamente acessível, mas, no entanto, requer uma base de dados ampla com informação detalhada.

O processo de aquisição dos dados morfológicos, nomeadamente, na definição da primeira linha de atuação, considerada como a duna frontal (pré-duna) teve implicações nos resultados obtidos, conduzindo a sobrestimativas, em especial para erosão nas ilhas do flanco oriental e para galgamento na zona oriental da Ilha da Barreta e na extremidade nascente da zona

oriental da Ilha da Culatra. No caso específico das sobrestimativas obtidas para as seções na “antiga” Praia da Fuseta da Ilha da Armona, estas estão relacionadas com o facto de os dados morfológicos utilizados no presente trabalho ainda não considerarem as cotas mais elevadas resultantes das intervenções de requalificação dessa zona.

Os resultados obtidos no presente trabalho são representativos e fiáveis e acredita-se que as sobrestimativas obtidas poderão ser atenuadas através de um ajuste e atualização dos dados morfológicos de entrada.

Para a determinação do impacto de galgamento com maior precisão em áreas costeiras é imprescindível a obtenção dos parâmetros de profundidade e extensão de galgamento. A utilização da adaptação das formulações de Donnelly (2008) por Plomaritis *et al.* (2015) no presente trabalho, como abordagem utilizada para a determinação de extensão e profundidade de galgamento, mostrou ser uma metodologia acessível, prática e eficiente.

Os índices costeiros obtidos para tempestades com período de retorno de 50 anos são 1 vez superiores aos de PR 10 anos, para os níveis médios a muito elevados ( $\geq 3$ ), tanto para erosão como para galgamento. Por outro lado, apesar de neste estudo toda a análise do flanco oriental ter sido efetuada com base nas tempestades de E-SE, de menor magnitude comparativamente às tempestades de O-SO atuantes no flanco ocidental, os valores do índice de erosão para PR 10 anos apresentam grande similaridade entre ambos os flancos, com predominância de seções com nível baixo (2), à exceção em algumas seções da Ilha da Barreta. Assim, poderia ser dedutível que o flanco oriental sofresse menores impactos erosivos ao estarem influenciados por tempestades com menor magnitude. Contudo, como referido anteriormente, nos últimos anos ocorreram diversos eventos erosivos que refletiram maiores impactos nas ilhas do flanco oriental e, nomeadamente, para um desses eventos de tempestade em particular ocorreu com orientação predominante de SO. Assumindo-se, assim, a necessidade de aprofundar os estudos de forma a melhorar os conhecimentos neste sentido.

A influência da batimetria na propagação da agitação marítima junto à costa é claramente reconhecida. Castelle *et al.* (2018) constataram que a batimetria consiste num fator determinante na resposta dos corpos dunares ao impacto de tempestades e Garzon *et al.*

(2021) conseguiram melhorar a percentagem justificada de recuo de duna através da incorporação de uma variável relacionada com a posição da crista de uma barra arenosa. A não inclusão de dados batimétricos nos métodos utilizados neste estudo poderá ser um fator cumulativo para as sobrestimações obtidas, juntamente com os dados morfológicos. Assim, assume-se a importância da incorporação de dados batimétricos, com uma caracterização detalhada das barras submersas (posição, profundidade e extensão), assim como, de dados topográficos regularmente atualizados, em estudos futuros de vulnerabilidade costeira.

Apesar das limitações encontradas, relacionadas maioritariamente à sobrestimação de resultados, os métodos utilizados no presente trabalho demonstraram serem eficazes e são considerados de utilização valiosa para gestão costeira e redução de riscos nas zonas costeiras. Contudo, aconselha-se a aplicação dos mesmos métodos em zonas de estudo distintas, para que os mesmos sejam explorados e validados nas mesmas, de forma a aumentar a sua robustez e testar as suas limitações em ambientes e condições distintas.

Na perspetiva de cenários futuros tendo em conta as alterações climáticas, com o aumento do nível do mar, a redução de extensão de praia emersa (face de praia e largura de berma) é inevitável, o que trará consequências para todo o sistema da Ria Formosa. Assim, estudos similares ao deste trabalho com alguma periodicidade, são essenciais em termos de previsão e conhecimento de *hotspots* para tomada de medidas/ações que contribuam para a mitigação de erosão e galgamento nas barreiras arenosas que protegem o sistema lagunar da Ria Formosa, ecossistema de inúmeras espécies de fauna e flora, fonte económica da região e importante reservatório de captura de CO<sub>2</sub> da atmosfera.

## Referências

- Achad, M., Ferreira, Ó., Dias, J.A., 2014. Evaluation of Sedimentological and Morphological Changes Induced by the Rehabilitation of Sandy beaches from the Ria Formosa Barrier Island System (South Portugal). *Thalassas*, 30(2), 21-31.
- Almar, R., Coco, G., Bryan, K.R., Huntley, D.A., Short, A.D., Senechal, N., 2008. Video observations of beach cusp morphodynamics. *Marine Geology*. 254, 216–223.
- Almeida, L.P., Ferreira, Ó., Pacheco, A. 2010. Thresholds for morphological changes on an exposed sandy beach as a function of wave height. *Earth Surface Processes and Landforms* 36: 523–532.
- Almeida, L.P., Ferreira, Ó., Vousdoukas, M., Dodet, G. 2011a. Historical variation and trends in storminess along the Portuguese south coast. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11:2407–2417.
- Almeida, L.P., Ferreira, Ó., Taborda, R. 2011b. Geoprocessing tool to model beach erosion due to storms: application to Faro beach (Portugal). *Journal of Coastal Research*, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), 1830-1834. Szczecin, Poland, ISSN 0749-0208.
- Almeida, L.P., Vousdoukas, M.I., Ferreira, Ó., Rodrigues, B.A., Matias, A. 2012. Thresholds for storm impacts on an exposed sandy coastal area in southern Portugal. *Geomorphology* 143:3-12.
- Andrade, C.A., 1990. O Ambiente de Barreira da Ria Formosa, Algarve - Portugal. Tese de doutoramento em Geologia, especialidade de Geologia do Ambiente. Lisboa, 645p (não publicado).
- Armaroli, C., Ciavola, P., Perini, L., Lorito, S., Valentini, A., Masina, M., 2012. Critical storm thresholds for significant morphological changes and damage along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Geomorphology* 143–144: 34–51.
- Armaroli, C., Duo, E., 2017. Validation of the coastal storm risk assessment framework along the Emilia-Romagna coast. *Coastal Engineering*.
- Backstrom, J.T., Jackson, D.W.T., Cooper, J.A.G., Malvárez, G.C., 2008. Storm-driven shoreface morphodynamics on a low-wave energy delta: the role of nearshore topography and shoreline orientation. *Journal Coastal Research* 24, 1379–1387.
- Balica, S.F., Wright, N.G., 2009. A network of knowledge on applying an indicator-based methodology for minimizing flood vulnerability. *Hydrological Processes* 23(20): 2983–2986.

- Balica, S.F., Wright, N.G., van der Meulen, F., 2012. A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. *Natural Hazards*, 64, 73-105.
- Balsillie, J., 1986. Beach and coast erosion due to extreme event impact. *Shore and Beach* 54(4): 22–37.
- Battjes, J.A., 1974. Surf similarity. *Proceedings of the 14th Conference of Coastal Engineering*. ASCE, Copenhagen, Denmark, pp. 466-480.
- Battjes, J.A., 1974b. Computation of set-up, longshore currents, run-up and overwash due to wind-generated waves. Report 74-2, Committee on Hydraulics, Department of Civil Engineering. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Bernardo, P., Bastos, R., Alveirinho Dias, J., 2002. Historic Roots for Barrier Island Occupation in the Ria Formosa. *Littoral, The Changing Coast*. EUROCOAST / EUCC, Porto – Portugal Ed.
- Bettencourt, P., 1985. Géomorphologie et processus d'évolution récente de la côte sotavento (Algarve, Sud Portugal). *Rapport D.E.A., Université de Bordeaux I*, 92 p. (in French).
- Birkemeier WA. 1979. The effects of the 19 December 1977 coastal storm on beaches in North Carolina and New Jersey. *Shore and Beach* 47: 7–15.
- Blenkinsopp, C.E., Matias, A., Howe, D., Castelle, B., Marieu, V., Turner, I.L., 2016. Wave runup and overwash on a prototype-scale sand barrier. *Coastal Engineering* 113:88–103.
- Bossom, E., Jiménez, J.A., 2011. Probabilistic coastal vulnerability assessment to storms at regional scale – application to Catalan beaches (NW Mediterranean). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11:475–484.
- Brooks, N., Nicholls, R., Hall, J., 2006. *Sea level rise: coastal impacts and responses*. Norwich, WBGU ISBN 3-936191-13-1 Berlin.
- Callaghan, D.P., Nielsen, P., Short, A.D., Ranasinghe, R., 2008. Statistical simulation of wave climate and extreme beach erosion. *Coastal Engineering* 55:375–390.
- Callaghan, D.P., Ranasinghe, R., Short, A.D., 2009. Quantifying the storm erosion hazard for coastal planning. *Coastal Engineering* 56:90–93.
- Capitão, R.J.P., 1992. Valores Extremos da Agitação Marítima – Síntese dos dados temporais ocorridos em Portugal Continental. *Relatório provisório*. LNEC, Departamento de Hidráulica, Núcleo de Portos e Praias, Lisboa, 8 p.
- Carrasco, A.R., 2006. Evolution of a restricted fetch environment: the case of Ria Formosa backbarrier, Algarve, Portugal. M.Sc. Thesis, University of Plymouth, U.K.
- Carrasco, A.R., Ferreira, O., Matias, A., Freire, P., 2012. Flood hazard assessment and management of fetch-limited coastal environments. *Ocean and Coastal Management* 65:15-25.

- Carrasco, A.R., Ferreira, Ó., Matias, A, 2013. Managing flood risk in fetch-limited environments in: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O’Hare, T.J. (eds.), Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, pp. 892-897, ISSN 0749-0208.
- Carter, R.W.G., 1988. Coastal environments. London: Academic Press Limited, 617 p.
- Carvalho, M.M., 1994. Valores Extremos da Agitação Marítima – Temporais: Base de dados VALEXT. Clima de agitação marítima na costa portuguesa, NATO PO-WAVES sub-projecto A, Lisboa, 25 p.
- Castelle, B., Guillot, B., Marieu, V., Chaumillon, E., Hanquiez, V., Bujan, S., Poppeschi, C., 2018. Spatial and temporal patterns of shoreline change of a 280-km high-energy disrupted sandy coast from 1950 to 2014: SW France. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 200, 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.11.005>
- Ceia, F.R., 2009. Vulnerabilidade das Ilhas Barreira e dinâmica da Ria Formosa na óptica de gestão. *Revista da Gestão Costeira Integrada* 9 (1): 57-77.
- Ciavola, P., Taborda, R., Ferreira, Ó., Dias, J.A., 1997. Field measurements of longshore sand transport and control processes on a steep meso-tidal beach in Portugal. *Journal of Coastal Research* 13 (4), 1119–1129.
- Ciavola, P., Ferreira, Ó., Haerens, P., Van Koningsveld, M., Armaroli, C., 2011. Storms impacts along European coastlines. Part2: lessons learned from the MICORE project. *Environmental Science and Policy* 14, 924-933. doi:10.1016/j.envsci.2011.05.009
- Cleary, W.J., Hosier, P.E., 1979. Geomorphology, washover history, and inlet zonation: Cape Lookout to Bird Island (North Carolina), In Leatherman, S. P. (ed.) *Barrier Islands: from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*. Academic, New York, 237-271.
- Cooper, W.S., 1958. Coastal sand dunes of Oregon and Washington. *Memoirs of the Geological Society of America*, Memoir 72, 1–6.
- Cooper, J.A.G., McLaughlin S., 1998. Contemporary multidisciplinary approaches to coastal classification and environmental risk analysis. *Journal of Coastal Research*, 14(2), 512-524.
- Costa, F., 2000. *A Pesca do Atum nas Armações da Costa Algarvia*, Editorial Bizâncio, Lisboa, 192 p.
- Costa, M., Silva, R., Vitorino, J., 2001. Contribuição para o estudo do clima de agitação marítima na costa portuguesa. Instituto Hidrográfico, Lisboa, 20p.
- Cox, N., Dunkin, L.M., Irish, J.L., 2013. An empirical model for infragravity swash on barred beaches, *Coastal Eng.*, 81, 44–50.
- Davidson, M., Van Koningsveld, M., de Kruif, A., Rawson, J., Holman, R., Lamberti, A., Medina, R., Kroon, A., Aarninkhof, S., 2007. The CoastView project: Developing video-

- derived Coastal State Indicators in support of coastal zone management. *Coastal Engineering* 54:463–475.
- Davidson-Arnott, R., 2010. *An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*, Cambridge University Press, 458p.
- De Angeli, S., D'Andrea, M., Cazzola, G., Duo, E., Reborá, N., 2017. Coastal risk assessment framework: comparison of fluvial and marine inundation impacts in Bocca di Magra, Italy. *Coastal Engineering*.
- Dean, R., 1977. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. *Ocean Engineering Report No. 12*, University of Delaware. 45p.
- Dias, J.A., 1988. Aspectos geológicos do Litoral Algarvio. *Geonovas*, 10: 113-128.
- Dias, J. M. Alveirinho, 1987. *Dinâmica Sedimentar e Evolução Recente da Plataforma Continental Portuguesa Setentrional*, Dissertação de Doutoramento, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 384p.
- Dias, J.A., Ferreira, Ó., Matias, A., Vila-Concejo, A., Sá-Pires, C., 2003. Evaluation of soft protection techniques in barrier islands by monitoring programs: case studies from Ria Formosa (Algarve-Portugal). *Journal of Coastal Research* SI 35:117–131.
- Dingler, J.R., Hsu, S.A., Reiss, T.E., 1992. Theoretical and measured aeolian sand transport on a barrier island, Louisiana, USA. *Sedimentology*, 39:1031-1043.
- Divoky, D., McDougal, W. G., 2006. Response-based coastal flood analysis, Proc. 30th Int. Conf. on Coastal Engineering ASCE:5291–5301.
- Dolan, R., Hayden, B. 1981. Storms and shoreline configuration. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51: 737-744.
- Dolan, R., Davies, R.E., 1994. Coastal storm hazards. *Journal of Coastal Research* SI12: 103–114.
- Donnelly, C., Kraus, N., Larson, M., 2006. "State of knowledge on measurement and modeling of coastal overwash". *Journal of Coastal Research*. 22, 4p.
- Donnelly, C., Ranasinghe, R., Larson, M., 2006b. Numerical Modeling of Beach Profile Change Caused by Overwash. *Coastal Dynamics*, 14p.
- Donnelly, C., 2007. Morphologic change by overwash: Establishing and evaluating predictors. *Journal of Coastal Research*, SI 50, 520-526.
- Donnelly, C., Sallenger, A.H., 2007. Characterization and modeling of washover fans. *Proceedings of Coastal Sediments '07*, USACE, New Orleans, USA, pp. 2061–2073.
- Donnelly, C., 2008. *Coastal Overwash: Processes and modelling*. Doctoral thesis – Water resources engineering. Faculty of Engineering, Lund University, 60 p. ISBN 978-91-628-7347-9.

- Donnelly, C., Larson, M., Hanson, H., 2009. A numerical model of coastal overwash. Proc. Institution of Civil Engineering, Maritime Engineering: 162 (3), 105–114.
- Doornkamp, J.C., 1998. Coastal flooding, global warming and environmental management. Journal of Environmental Management, 52(4), 327-333.
- Dorman, C., Beardsley, R., Limeburner, R., 1995. Winds in the Strait of Gibraltar, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 121, 1903–1921.
- Dorsch, W., Newland, T., Tassone, D., Tymons, S., Walker, D., 2008. A statistical approach to modelling the temporal patterns of ocean storms, Journal of Coastal Research, 24, 1430–1438.
- du Gommès, R., Guerny, J., Nachtergaele, F., Brinkman, R., 1997. Potential impacts of sea-level rise on populations and agriculture. FAO, Rome.
- Duarte, C., Matias, A., Dias, J.A., Ferreira, Ó., 1999. Vulnerabilidade dos corpos dunares do Algarve. 10º Congresso do Algarve: 477-490.
- Dubois, R.N., 1995. The transgressive barrier model: an alternative to two dimensional volume balanced models. Journal of Coastal Research, 11:1272-1286.
- Duo E., Ciavola P., eds., 2015. Review report of key challenges and lessons learned from historical extreme hydro-meteorological events. Unpublished report (deliverable D1.1) RISC-KITProject.
- Edelman, T., 1968. Dune erosion during storm conditions. Proceedings of 11th Conference on Coastal Engineering, ASCE: 719–722.
- Fenster, M.S., Dolan, R., Morton, R.A., 2001. Coastal storms and shoreline change: signal or noise? Journal of Coastal Research 17(3): 714–720.
- Ferreira, Ó., Dias, J.A., Gama, C., Taborda, R., 1995. Quantification of beach erosion caused by storms on the Portuguese coast. In Directions in European Coastal Management, Healy MG, Doody JP (eds). Samara Publishing: 267–273. Tresaith, Cardigan, UK.
- Ferreira, Ó., Martins, J.C., Dias, J.A., 1997. Morfodinâmica e Vulnerabilidade da Praia de Faro. Seminário sobre a zona Costeira do Algarve, Faro, 67-76.
- Ferreira, Ó., 1998. Morfodinâmica de praias expostas: aplicação ao sector costeiro Aveiro-Cabo Mondego. PhD thesis, Universidade do Algarve, 337p.
- Ferreira, Ó., 2004. Coastal Zone Vulnerability and Risk Evaluation. A Tool For Decision-Making (An Example In The Caparica Littoral – Portugal). Journal of Coastal Research, SI 39, 1590–1593.
- Ferreira, Ó., 2005. Storm groups versus extreme single storms: predicted erosion and management consequences. Journal of Coastal Research, SI(42). West Palm Beach (Florida), ISSN:0749-0208.

- Ferreira, Ó., 2006. The role of storm groups in the erosion of sandy coasts. *Earth Surface Processes and Landforms* 31:1058–1060.
- Ferreira, Ó., Garcia, T., Matias, A., Taborda, R., Dias, J.A., 2006. An integrated method for the determination of set-back lines for coastal erosion hazards on sandy shores. *Continental Shelf Research*, 26:1030–1044.
- Ferreira, Ó., Vousdoukas, M.V., Ciavola, P., 2009a. MICORE review of climate change impacts on storms occurrence (open access, Deliverable WP1.4).
- Ferreira, Ó., Ciavola, P., Armaroli, C., Balouin, Y., Benavente, J., Del Río, L., Deserti, M., Esteves, L.S., Furmanczyk, K., Haerens, P., Matias, A., Perini, L., Taborda, R., Terefenko, P., Trifonova, E., Trouw, K., Valchev, N., Van Dongeren, A., Van Koningsveld, M., Williams, J.J., 2009b. Coastal storm risk assessment in Europe: examples from 9 study sites. *Journal of Coastal Research*, 56 (Special Issue), 1632 – 1636.
- Ferreira, Ó., 2011. Morphodynamic impact of inlet relocation to updrift coast: Ancão Peninsula (Ria Formosa, Portugal). *The Proceedings of the Coastal Sediments*, vol.1, 497-504.
- Ferreira, Ó., Matias, A., Pacheco, A., 2016a. The East Coast of Algarve: a Barrier Island Dominated Coast. *Thalassas*, 32:75–85. DOI 10.1007/s41208-016-0010-1
- Ferreira, Ó., Viavattene, C., Jiménez, J., Bole, A., Plomaritis, T., Costas, S., Smets, S., 2016b. CRAF Phase 1, a framework to identify coastal hotspots to storm impacts. 3rd European Conference on Flood Risk Management, 9p.
- Ferreira, O., Viavattene, C., Jiménez, J.A., Bolle, A., das Neves, L., Plomaritis, T.A., McCall, R., van Dongeren, A.R., 2018. Storm-induced risk assessment: Evaluation of two tools at the regional and hotspot scale. *Coastal Engineering*, 13p. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.10.005>
- Filipe, A., Carvalho, M.M., Capitão, R., 1999. Valores extremos de agitação marítima. Faro - Tratamento local dos dados existentes. Portugal, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Relatório 179/99-NPP, 51p.
- Fisher, J.S., Leatherman, S.P., Perry, F.C., 1974. Overwash processes on Assateague Island. *Proceedings of 14th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Copenhagen, Denmark, pp. 1194–1211.
- Fletcher, C.H., Richmond, B.M., Barnes, G.M., Schroeder, T.A., 1995. Marine flooding on the coast of Kauai during Hurricane Iniki: hindcasting inundation components and delineating washover. *Journal of Coastal Research*, 11(1), 188–204.
- Folk, R.L., 1980. *Petrology of the Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company, Austin, Texas, U.S.A.
- Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Poseiro, P., Capitão, R., Santos, J.A., Pinheiro, L.P., Rodrigues, A., Sabino, A., Rodrigues, M.C., Raposeiro, P.D., Ferreira, J.C., Silva, C., Simões, A.,

- Azevedo, E.B., 2013. O PROJETO HIDRALERTA – Sistemas de previsão e alerta de inundações em zonas costeiras e portuárias. 8<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, 24p.
- Fritz, H.M., Blount, C., Sokolowski, R., Singleton, J., Fuggle, A., McAdoo, B., Moore, A., Grass, C., Tate, B., 2007. Hurricane Katrina storm surge distribution and field observations on the Mississippi Barrier Islands. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 74, 12–20.
- Fuchs, S., Kuhlicke, C., Meyer, V., 2011. Editorial for the special issue: vulnerability to natural hazards—the challenge of integration. *Natural Hazards* 58, 609–619. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9825-5>
- Gama, C., Dias, J.A., Ferreira, Ó., Taborda, R., 1994. Analysis of storm surge in Portugal, between June 1986 and May 1988. *Littoral* 94, 381-387.
- Gama, C., Taborda, R., Dias, J.A., 1997. Sobreelevação do nível do mar de origem meteorological (“Storm Surge”), em Portugal continental. *Colectânea de ideias sobre zona costeira de Portugal*, Associação Eurocoast-Portugal, 131-149.
- Garcia, T., Ferreira, Ó., Matias, A., Dias, J.A., 2002. Recent evolution of Culatra Island. *Proceedings of 6th International Symposium Littoral 2002, EUROCOAST, Porto, Portugal*, pp. 423-429.
- Garcia, T., 2008. Overwash vulnerability assessment based in long-term washover evolution. Application to the Ria Formosa Barrier Islands System (Southern Portugal). Master Thesis Faro, Universidade do Algarve, 71pp.
- Garcia, T., Ferreira, Ó., Matias, A., Dias, J.A., 2010. Overwash vulnerability assessment based on long-term washover evolution. *Natural Hazards* (54), 225-244.
- Garcia, T., Reis, M.T., Poseiro, P., Fortes, C.J., Lopes, P., Lourenço, I., Azevedo, E., Rodrigues, M. da, 2016. Previsão e validação de galgamentos oceânicos no sistema HIDRALERTA. 13<sup>o</sup> Congresso da Água. Research Gate, 14p.
- Garnier, E., Ciavola, P., Spencer, T., Ferreira, O., Armaroli, C., McIvor, A., 2017. Historical analysis of storm events: Case studies in France, England, Portugal and Italy. *Coastal Engineering* 1-14.
- Garzon, J., Costa, S. Ferreira, Ó., 2021. Biotic and abiotic factors governing dune response to storm events. *Earth Surface processes and Landforms*. DOI: 10.1002/esp.5300
- Godschalk, D.R., Brower, D.J., Beatley, T., 1989. *Catastrophic Coastal Storms, Hazard Mitigation and Development Management*. Duke University Press, Durham.
- Gomes, N., Andrade, C., Nevin, C., McCluskey, J., Jackson, D., 1994. Aeolian sand transport in Culatra barrier, Ria Formosa (Portugal). *Proceedings of 2nd International Symposium Littoral'94, EUROCOAST, Lisbon, Portugal*, pp. 509–516.
- Gornitz, V.M., 1990. Vulnerability of the East Coast. *Journal of Coastal Research*, SI 9, 201-237.

- Gornitz, V.M., Daniels, R.C., White, T.W., Birdwell, K.R., 1993. The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the U.S. Southeast. U.S. Government Report, Oak Ridge National Laboratory Tennessee. DE-AC05-84OR21400.
- Guza, R.T., Thornton, E.B., 1982. Swash oscillations on a natural beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 87, 483–491
- Hall, M.J., Young, R.S., Thieler, E.R., Priddy, R.D., Pilkey, O.H., Jr., 1990. Shoreline response to Hurricane Hugo. *Journal of Coastal Research*, 6(1), 211–221.
- Hayes, M.O., 1967. Hurricanes as geological agents, south Texas coast. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 51: 937-942.
- Hedges, T.S., Mase, H., 2004. Modified Hunt's equation incorporating wave setup. *J. Waterw. Port. C-ASCE*. 130, 109–113.
- Hesp, P.A., Martínez, M.L. 2007. Disturbance processes and dynamics in coastal dunes. In Johnson, E. A., Miyanishi, K. (eds.), *Plant Disturbance Ecology*. Academic, San Diego, pp. 215–247.
- Holman, R.A., 1986. Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. *Coastal Engineering* 9, 527–544.
- Honeycutt, M., Crowell, M., Douglas, B., 2001. Shoreline-position forecasting: impact of storms, rate-calculation methodologies, and temporal scales. *Journal of Coastal Research* 17(3): 721–730.
- Horn, D., Ling, L., 2006. Measurement and Modelling of Gravel Beach Groundwater Response to Wave Run-up: Effects on Beach Profile Changes. *Journal of Coastal Research*, 22(5): 1241-1249.
- Horta, J., Moura, D., Gabriel, S., Ferreira, Ó., 2013. Measurement of pocket beach morphology using geographic information technology: the MAPBeach toolbox. *Journal of Coastal Research: Special Issue 65 - International Coastal Symposium Volume 2*: 1397-1402.
- Houmb, O.G., Vik, I., 1977. On the Duration of Sea State. Division of Port and Ocean Engineering, Norwegian Institute of Technology, Trondheim.
- Hufschmidt, G.A., 2011. comparative analysis of several vulnerability concepts. *Natural Hazards* 58, 621–643. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9823-7>
- Hughes, S.A., 1981. Beach and Dune Erosion During Severe Storms. (Ph.D. thesis) University of Florida.
- Hughes, S.A., 2004. Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter. *Coastal Engineering* 51, 1085–1104.

- Hunt, I.A., 1959. Design of seawalls and breakwaters. *Journal of Waterways and Harbours Division*, ASCE 85 (WW3), 123– 152.
- Instituto da Água, 2009. *Estratégia Nacional para Gestão Integrada da Zona Costeira*. Lisboa, Portugal, 84 p.
- Instituto Geográfico Português, 2012. Nota técnica com informação sobre dados do marégrafo de Lagos. Divisão de Geodesia - IGP, 1 p.
- Instituto Hidrográfico, 2013. Notas sobre dados fornecidos da bóia ondógrafo de Faro. Instituto Hidrográfico, 1 p.
- Instituto Nacional de Estatística, I.P., 2011. *Censos - Resultados definitivos*. Portugal.
- Jiménez, J.A., Ciavola, P., Balouin, Y., Armaroli, C., Bosom, E., Gervais, M., 2009. Geomorphic coastal vulnerability to storms in microtidal fetch-limited environments: application to NW Mediterranean & N Adriatic Seas. *Journal of Coastal Research*, 56 (Special Issue), 1641-1645.
- Jiménez, J.A., 2010. Coastal State Indicators at the Conscience Cases Study. Concepts na Science for Coastal Erosion Management – CONSCIENCE. Commission of the European Communities Research. D17. 23 p.
- Jiménez, J., Sanuy, M., Ballesteros, C., Valdemoro, H., 2017. The Tordera Delta, a hotspot to storm impacts in the coast northwards of Barcelona (NW Mediterranean). *Coastal Engineering*.
- Kamphuis, J. W., 2010. *Introduction to Coastal Engineering and Management*, 2nd Edition – World Scientific. Advanced Series on Ocean Engineering: Volume 30, 564 p.
- Komar, P.D., 1976. *Beach processes and sedimentation*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 544p.
- Komar, P., McDougal, W.G., Marra, J.J., Ruggiero, P., 1999. The rational analysis of setback distances: Applications to the Oregon Coast. *Shore and Beach*, 67(1), 41–49.
- Kriebel, D.L., 1986. Verification study of a dune erosion model. *Shore and Beach* 54 (3).
- Kriebel, D.L., Dean, R.G., 1984. Beach and dune response to severe storm. Coastal and Oceanographic Engineering Department, University of Florida, 1589-1599.
- Kriebel, D.L., Dean, R.G., 1985. Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion. *Coastal Engineering*, 9, 221–245.
- Kriebel, D.L., Dean, R.G., 1993. Convolution method for time-dependent beach-profile response. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering (ASCE)*, 119(2), 204–226.
- Leatherman, S.P., 1976. Barrier island dynamics: Overwash processes and aeolian transport. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, ASCE, 1958-1974.

- Leatherman, S.P., Williams, A.T., Fisher, J.S., 1977. Overwash sedimentation associated with a largescale northeaster. *Marine Geology*, 24: 109-121.
- Long, J.W., de Bakker, A.T.M., Plant, N.G., 2014. Scaling coastal dune elevation changes across storm-impact regimes. *Geophysical Research Letters* 41, 2899-2906.
- Lorenzo-Trueba, J., Ashton, A.D., 2014. Rollover, drowning, and discontinuous retreat: distinct modes of barrier response to sea-level rise arising from a simple morphodynamic model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119, Issue 4, 779-801. 2013JF002941.
- Marchand, M. (Ed.), 2010. *Concepts and Science for Coastal Erosion Management. Concise Report for Policy Makers*. Deltares, Delft.
- Martins, J.T., Ferreira, Ó., Ciavola, P., Dias, J.A., 1996. Monitoring of profile changes at Praia de Faro, Algarve: a tool to predict and solve problems. In: Taussik, J., Michell, J. (Eds.), *Partnership in Coastal Zone Management*. Samara Publishing Limited, Cardigan.
- Martins, J.T., Ferreira, Ó., Dias, J.M., 1997. A susceptibilidade da Praia de Faro à erosão por tempestade. In: *Proceedings of the Ninth Congresso do Algarve, Racal Clube, Faro, Portugal*, 206–213.
- Mase, H., 1989. Random wave runup height on gentle slope. *J. Waterw. Port. C-ASCE* 115, 649–661.
- Masselink, G., Hughes M.G., 2003. *Introduction to Coastal Processes & Geomorphology*. Hodder Education, and Hachette UK Company, pp. 354.
- Matias, A., Dias, J.A., Williams, A.T., Ferreira, Ó., 1997. Vulnerabilidade das dunas da Ria Formosa. 9º Congresso do Algarve, Vilamoura, Portugal, 231-239.
- Matias, A., Vila-Concejo, A., Ferreira, Ó., Morris, B., Dias, J.A., 2007. Sediment transport patterns during overwash. *Proceedings of Coastal Sediments'07, ASCE*, 2049–2060.
- Matias, A., Ferreira, Ó., Vila-Concejo, A., Garcia, T., Dias, J.A., 2008. Classification of washover dynamics in barrier islands. *Geomorphology* 97, 655–674.
- Matias, A., Vila-Concejo, A., Ferreira, Ó., Morris, B., Dias, J.A., 2009. Sediment Dynamics of Barriers with Frequent Overwash. *Journal of Coastal Research: Volume 25, Issue 3: 768 – 780*.
- Matias A., Ferreira O., Vila-Concejo A., Morris, B., Dias, J.A., 2010. Short-term morphodynamics of non-storm overwash. *Marine Geology*, 274(1–4), 69–84.
- Matias, A., Blenkinsopp, C.E., Masselink, G., 2014. Detailed investigation of overwash on a gravel barrier. *Marine Geology*, 350: 27-38.
- Matias, A., Carrasco, A.R., Loureiro, C., Almeida, S., Ferreira, Ó., 2014b. Nearshore and foreshore influence on overwash of a barrier Island. In: Green, A.N., Cooper, J.A.G.

- (eds.), Proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 66, ISSN 0749-0208.
- Matulla, C., Schöner, W., Alexandersson, H., 2007. European storminess: late nineteenth century to present, *Climate Dynamics*, 31, 125– 130.
- McCall, R.T., Van Thiel de Vries, J.S.M., Plant, N.G., Van Dongeren, A.R., Roelvink, J.A., Thompson, D.M., Reniers, A.J.H.M., 2010. Two-dimensional time dependent hurricane overwash and erosion modeling at Santa Rosa Island. *Coastal Engineering* 57 (7), 668–683.
- McCall, R.T., Masselink, G., Poate, T., Bradbury, A., Russell, P., Davidson, M.A., 2013. Predicting overwash on gravel barriers. *Journal of Coastal Research*, 1473-1478. DOI:10.2112/SI65-249.1
- McFadden, L., Nicholls, R. J., Penning-Rowsell, E., 2007. *Managing Coastal vulnerability*, Elsevier, 262 pp.
- McLaughlin, S., McKenna, J., Cooper, J.A.G., 2002. Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities. *Journal of Coastal Research*, SI 36, 487-497.
- Mendelssohn, I.A., Hester, M.W., Monteferrante, F.J., Talbot, F., 1991. Experimental dune building and vegetative stabilization in a sand-deficient barrier island setting on the Louisiana coast, USA. *Journal of Coastal Research*, 7(1):137-149.
- Mendoza, E.T., 2008. Coastal Vulnerability to storm in the Catalan Coast. PhD Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 88 p.
- Mendoza, E.T., Jiménez, J.A., 2006. Storm-induced beach erosion potencial on the Catalanian coast. *Journal of Coastal Research*, SI 48 (Proceeding of the 3rd Spanish Conference on Coastal Geomorphology), 81-88. Las Palmas de Gran Canari – Spain, ISSN:0749-0208.
- Mendoza, E.T., Jiménez, J.A., 2009. Regional geomorphic vulnerability analysis to storms for Catalan beaches, P. I. *Civil Eng-Mar. En.*, 162(3), 127–135.
- Menoni, S., Molinari, D., Parker, D., Ballio, F., Tapsell, S., 2010. Assessing multifaceted vulnerability and resilience in order to design risk-mitigation strategies. *Natural Hazards* 52 (1) 28p.
- Messner, F., Penning-Rowsell, E., Green, C., Meyer, V., Tunstall, S., Van der Veen, A., 2007. Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods. EU Floodsite project N. GOCECT-2004-505420.
- Mon, T.O., 2020. Coastal Hazard Evolution due to wave actions under different climate change scenarios in Ria Formosa. Thesis. University of Bologna. 102p.
- Morais, C.C., Abecasis, F., 1978. Storm surge effects at Leixões. *Memórias do LNEC*, 503, 23 p.

- Morton, I. D., Bowers, J., Mould, G. 1997. Estimating return period wave heights and wind speed using a seasonal point process model, *Coastal Engineering*, 31, 305–326.
- Morton, R.A., Gibeaut, J.C., Paine, J.G., 1995. Meso-scale transfer of sand during and after storms: implications for prediction of shoreline movement. *Marine Geology* 126: 161–179.
- Morton, R.A., Ward, G.H., White, W.A., 2000. Rates of sediment supply and sea-level rise in a large coastal lagoon. *Marine Geology*, 167: 261-284.
- Morton, R.A., 2002. Factors controlling storm impacts on coastal barriers and beaches – a preliminary basis for near real-time forecasting. *Journal of Coastal Research* 18(3): 486–501.
- Morton, R.A., Sallenger, A.H., 2003. Morphological impacts of extreme storms on sandy beaches and barriers. *Journal of Coastal Research*, 19(3), 560–573.
- Niedoroda, A.W., Swift-Donald, J.P., Figueiredo, Jr. A.G., Freeland, G.L., 1985. Barrier Island evolution, middle Atlantic shelf, U.S.A. Part II: evidence from the shelf floor. *Marine Geology*, 63:363-396.
- Nielsen, P., Hanslow, D.J., 1991. Wave runup distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research*, 7 (4), 139 –1152.
- Nordstrom, K.F., Jackson, N.L., 1995. Temporal scales of landscape change following storms on a human-altered coast, New Jersey, USA. *Journal of Coastal Conservation*, 1(1), 51–62.
- Oliveira, S.C., Catalão, J., Ferreira, Ó., Dias, J.M.A., 2008. Evaluation of cliff retreat and beach nourishment in southern Portugal using photogrammetric techniques. *Journal of Coastal Research*, 24 (4C), 184-193.
- Ollerhead, J. 1993. The evolution of Buctouche Spit, New Brunswick, Canada. Ph.D. Thesis, University of Guelph, 156 pp, in Davidson-Arnott, R., 2010. *An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*, Cambridge University Press, 458p.
- Orford, J.D., Carter, R.W.G. 1984. Mechanisms to account for the longshore spacing of overwash throats on a coarse clastic barrier in southeast Ireland. *Marine Geology*, 56: 207-226.
- Orford, J.D., Jennings, S., Pethick, J., 2003. Extreme storm effect on gravel dominated barriers. *Proceedings Coastal Sediments 03*, ASCE, 14 pp.
- Otvos, E.G., 1977. Post-pleistocene history of the United States inner continental shelf: significance to origin of barrier islands: discussion and reply. *Geological Society of America Bulletin*, 87:734-736.
- Pacheco, A., Vila-Concejo, A., Ferreira, Ó., Dias, J.A., 2007. Present Hydrodynamics of Ancão Inlet, 10 years after its relocation. *Proceedings of Coastal Sediments 07*, ASCE, CD-ROM, 14 p.

- Pacheco, A., Vila-Concejo, A., Ferreira, Ó., Dias, J.A., 2008. Assessment of tidal inlet evolution and stability using sediment budget computations and hydraulic parameters analysis. *Marine Geology* 247(1-2):104-127.
- Pacheco, A., Ferreira, Ó., Williams, J. J., Garel, E., Vila-Concejo, A., Dias, J. A., 2010. Hydrodynamics and equilibrium of a multiple-inlet system. *Marine Geology*, 274(1–4), 32–42.
- Penning-Rowsell, E.C., Priest, S., Parker, D., Morris, J., Tunstall, S., Viavattene, C., Chatterton, J., Owen, D., 2013. *Flood and Coastal Erosion Risk Management: A Manual for Economic Appraisal*. Routledge, London.
- Pérez-Maqueo, O., Intralawan, A., Martinez, M.L., 2007. Coastal disasters from the perspective of ecological economics, *Ecological Economics* 63:273-284.
- Pessanha, L.E., Pires, H.N.O, 1981. Elementos sobre o clima de agitação marítima na costa sul do Algarve. Relatório do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, Portugal, 66p.
- Pethick, J.S., Crooks, S., 2002. Development of a coastal vulnerability index: a geomorphological perspective, *Environment Conservation*, 27(04), 359–367.
- Pierce, J.W., 1970. Tidal inlets and washover fans. *The Journal of Geology*, 78: 230-234.
- Pires, H.N.O., 1989. Alguns aspectos do clima de agitação marítima de interesse para a navegação na costa de Portugal. Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INMG), Lisboa, 34p.
- Pires, H.N.O., 1998. Project INDIA. Preliminary Report on the Wave Climate at Faro. Portugal, Lisboa: Instituto de Meteorologia – Instituto Superior Técnico, 37 p.
- Plant, N.G., Stockdon, H.F., 2012. Probabilistic prediction of barrier-island response to hurricanes, *Journal of Geophysical Research*, 117(F3), F03015.
- Plomaritis, T.A., Costas, S., Ferreira, O., 2015. Overwash hazards assessment using a simplified process based approach. VIII Jornadas de Geomorfologia Litoral. GEO-temas 15 ISSN 1576-5172: 129-132.
- Plomaritis, T.A., Ferreira, O., Costas, S., 2018. Regional assessment of storm related overwash and breaching hazards on coastal barriers. *Coastal Engineering* 134, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.09.003>
- Prasad, K.V.S.R., Arun Kumar, S.V.V., Venkata Ramu, Ch., Sreenivas, P., 2009. Significance of nearshore wave parameters in identifying vulnerable zones during storm and normal conditions along Visakhapatnam coast, India, *Natural Hazards*, 49, 347–360.
- Psuty, N.P., 1986. Impacts of impending sea-level rise scenarios: the New Jersey barrier island responses. *Bulletin of the New Jersey Academy of Sciences*, 31:29-36.

- Puertos del Estado, 2010. Publicação interna sobre conjunto de dados SIMAR-44-44. Ministério de Fomento, 6 p.
- Puertos del Estado, 2012a. Publicação interna sobre conjunto de dados WANA. Ministério de Fomento, 6 p.
- Puertos del Estado, 2012b. Publicação interna sobre conjunto de dados REDMAR. Ministério de Fomento, 7 p.
- Puertos del Estado, 2015. Publicação interna sobre conjunto de dados REDEXT. Ministério de Fomento, 6 p.
- Ramieri, E., Hartley, A., Barbanti, A., Duarte Santos, F., Gomes, A., Hilden, M., Laihonon, P., Marinova, N., Santini, M., 2011. Methods for assessing coastal vulnerability to climate change. ETC CCA Technical paper, 94 p.
- Ramos, L., Dias, J.A., 2000. Atenuação da vulnerabilidade a galgamentos oceânicos no sistema da Ria Formosa mediante intervenções suaves. 3º Simpósio sobre a Margem Continental Ibérica Atlântica. Faro, 361–362.
- Rangel-Buitrago, N., Anfuso, G., 2011. Coastal storm characterization and morphological impacts on sandy coasts. *Earth Surface Processes and Landforms* 36, 1997–2010.
- Ritchi, W., Penland, S., 1988. Rapid dune changes associated with overwash processes on the deltaic coast of South Louisiana. *Marine Geology*, 81, 97–122.
- Rodrigues, B.A., Matias, A. Ferreira, Ó, 2012. Overwash hazard assessment. *Geologica Acta*, vol.10, 4: 427-437.
- Roelvink, J.A., van Kessel, T.m., Alfageme, S., Canizares, R., 2003. Modelling of barrier island response to storms. In: *Proceedings Coastal Sediments '03* (Clearwater, Florida).
- Roelvink, D., Reniers, Ad., van Dongeren, Ap., van Thiel de Vries, Jaap., McCall, R., Lescinski, J., 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering* 56, 1133-1152.
- Rosa, F., Rufino, M.M., Ferreira, Ó., Matias, A., Brito, A.C., Gaspar, M.B., 2013. The influence of coastal processes on inner shelf sediment distribution: The Eastern Algarve Shelf (Southern Portugal), *Geologica Acta*, 11(1): 59–73.
- Rose, A., 2010. Economic principles, issues, and research priorities in hazard loss estimation. In *modelling spatial and economic impacts of disasters* – Springer ed. 13–36.
- Ruggiero, P., Komar, P.D., McDougal, W.G., Marra, J.J., Beach, R.A., 2001. Wave runup extreme water levels and the erosion of properties backing beaches. *Journal of Coastal Research*. 17, 407–419.
- Sallenger, A.H., 2000. Storm impact scale for barrier islands. *Journal of Coastal Research*, 16:890-895.

- Sánchez-Arcilla, A., Jiménez, J.A., Valdemoro, H.I., 1998. The Ebro delta: morphodynamics and vulnerability, *Journal of Coastal Research*, 14(3), 754–772.
- Santos, F.D., Forbes, K., Moita, R., 2001. *Mudança Climática em Portugal. Cenários, Impactes e Medidas de Adaptação – SIAM. Sumário Executivo e Conclusões*, Gradiva, Lisboa, 24 p.
- Santos, F.D., Lopes, A.M., Moniz, G., Ramos, L., Taborda, R., 2014. *Gestão da Zona Costeira, O Desafio da Mudança. Relatório final do grupo de trabalho litoral*. 255 p.
- Scheuer, S., Haase, D., Meyer, V., 2011. Exploring multicriteria flood vulnerability by integrating economic, social and ecological dimensions of flood risk and coping capacity: from a starting point view towards an end point view of vulnerability. *Natural Hazards* 58, 731–751. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9666-7>
- Schuettrumpf, H. e Oumeraci, H., 2005. Layer thicknesses and velocities of wave overwash flow at sea dikes. *Coastal Engineering*, 52, pp 473-495.
- Schwartz, R.K. 1975. *Nature and Genesis of some Storm Washover Deposits*, US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Centre, Technical Memorandum 61: 67 pp.
- Seabloom, E.W., Ruggiero, P., Hacker, S., Mull, J., Zarnetske, P., 2013. Invasive grasses, climate change, and exposure to storm wave overwash in coastal dune ecosystems. *Global Change Biology*, 19(3), 824–832.
- Senechal, N., Coco, G., Bryan, K.R., Holman, R.A., 2011. Wave runup during extreme storm conditions, *Journal of Geophysical Research*, vol. 116, 13 p.
- Silva, R., Coelho, C., Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., 2008. A importância de alguns parâmetros hidromorfológicos em estudos de modelação das zonas costeiras. 3ª Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, 11 p.
- Sorensen, R.M., 2006. *Basic Coastal Engineering*, 3rd ed. New York: Springer Science+Business Media in Firoozfar, *et al.*, 2014. Beach Profiles and Sediments, a Case of Caspian Sea, *International Journal of Marine Science*, Vol.4, No.43, 1-9.
- Steetzel, H.J., 1993. *Cross-shore Transport During Storm Surges*. (Ph.D. thesis) Delft University of Technology.
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Sallenger, A.H., 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7), 573–588.
- Stockdon, H.F.; Sallenger, A.H.; Holman, R.A., Howd, P.A., 2007. A simple model for the spatially-variable coastal response to hurricanes. *Marine Geology*, 238(1), 1–20.
- Stockdon, H.F.; Doran, K.S., Sallenger, A.H., 2009. Extraction of LiDAR-based dune crest elevations for use in examining the vulnerability to beaches during inundation during hurricanes. In: Brock, J.C. and Purkis, S.J.(eds.), *Coastal Applications of Airbornen LiDAR*, *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 53, pp. 59–65.

- Taborda, R., Dias, J.A., 1992. Análise da sobreelevação do nível do mar de origem meteorológica durante os temporais de Fevereiro/Março de 1978 a Dezembro de 1981. *Geonovas*, nº especial 1, 89-97.
- Tawn, J. A., 1988. An extreme-value theory model for dependent observations. *Journal of Hydrology*, 101, 227–250.
- Teixeira, S., 2013. Evolução da gestão da erosão costeira nos últimos 50 anos Caso de estudo do litoral Quarteira-Garrão (Algarve-Portugal).
- U.S. Army Corps of Engineers, 1995. Coastal Geology. Engineer Manual 1110-2-1810, 297 p.
- U.S. Army Corps of Engineers, 2002. Coastal Classification and Morphology. Engineer Manual 1110-2-1100 (Part IV), 83 p.
- Valchev, N., Andreeva, N., Eftimova, P., Prodanov, B., Kotsev, I., 2016. Assessment of vulnerability to storm induced flood hazard along diverse coastline settings. *E3S Web of Conferences*, 7, 10002. In: FLOODrisk 2016-3rd European Conference on Flood Risk Management.
- van Gent, M.R.A., van Thiel de Vries, J.S.M., Coeveld, E.M., de Vroega, J.H., van de Graaff, J., 2008. Large-scale dune erosion tests to study the influence of wave periods. *Coastal Engineering*, 55, 1041–1051.
- van Koningsveld, M., Davidson, M., Huntley, D., Medina, R., Aarninkhof, S., Jiménez, J.A., Ridgwell, J., de Kruif, A., 2007. A critical review of the CoastView project: Recent and future developments in coastal management video systems. *Coastal Engineering* 54:567–576.
- van Rijn, L.C., 2009. Prediction of dune erosion due to storms. *Coastal Engineering*. 56, 441–457.
- Viavattene, C., Micou, A.P., Owen, D., Priest, S., Parker, D., Spencer, T., Moller, I, McIvor, A., 2015a. D.2.2 – Coastal Vulnerability Indicator Library. RISC-KIT – Resilience-Increasing Strategies for Coasts – Toolkit, 136p.
- Viavattene, C., Jimenez, J.A., Owen, D., Priest, S., Parker, D., Micou, A.P., Ly, S., 2015b. D.2.3 – Coastal Risk Assessment Framework – Guidance Document. RISC-KIT – Resilience-Increasing Strategies for Coasts – Toolkit, 144p.
- Viavattene, C., Jimenez, J.A., Ferreira, Ó., Priest, S., Owen, D., McCall, R., 2018. Selecting coastal hotspots to storm impacts at the regional scale: a Coastal Risk Assessment Framework. *Coastal Engineering* 134, 33-47.
- Vila-Concejo, A., Matias, A., Ferreira, Ó., Duarte, C., Dias, J.A., 2002. Recent evolution of the natural inlets of a barrier island system in Southern Portugal. *Journal of Coastal Research* SI (36), 741–752.

- Vila-Concejo, A., Ferreira, Ó., Matias, A., Dias, J.M.A., 2003. The first two years of an inlet: sedimentary dynamics. *Continental Shelf Research* 23, 1425–1445.
- Vila-Concejo, A., Ferreira, Ó., Matias, A., Morris, B., Dias, J.A., 2004. Lessons from inlet relocation: Examples from Southern Portugal. *Coastal Engineering*, 51 (10), 967–990.
- Vila-Concejo, A., Matias, A., Pacheco, A., Ferreira, Ó., Dias, J.A., 2006. Quantification of inlet-related hazards in barrier island systems. An example from the Ria Formosa (Portugal). *Continental Shelf Research* 26, 1045–1060.
- Vousdoukas, M.I., Wziatek, D., Almeida, L.P., 2012. Coastal vulnerability assessment based on video wave run-up observations at mesotidal, step-sloped beach. *Ocean Dynamics* 62:123-137.
- Vousdoukas, M.I., 2012. Erosion/accretion patterns and multiple beach cusp systems on a meso-tidal, steeply-sloping beach. *Geomorphology* 141, 34-46.
- Vousdoukas, M.I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Feyen, L., 2017. Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future*.
- WASA, 1998. Changing waves and storms in the northeast Atlantic, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 741–760.
- Williams, S.J., Meisburger, E.P., 1987. Sand sources for the transgressive barrier coast of Long Island, New York: evidence for landward transport of shelf sediments. In: *Proceedings coastal sediments '87*. New York: ASCE. 1517-1532.
- Willroth, P., Revilla Diez, J., Arunotai, N., 2011. Modelling the economic vulnerability of households in the Phang-Nga Province (Thailand) to natural disasters. *Natural Hazards* 58, 753–769. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9635-1>
- Youssef, A.M., Pradhan, B., Gaber, A.F.D., Buchroithner, M.F., 2009. Geomorphological hazard analysis along the Egyptian Red Sea coast between Safaga and Quseir, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 751–766, doi:10.5194/nhess-9-751-2009.
- Zhang, K., Douglas, B.C., Leatherman, S.P., 2001. Beach erosion potential for severe nor'easters. *Journal of Coastal Research* 17(2): 309–321.
- Zhang, K., Douglas, B.C., Leatherman, S.P. 2004. Global warming and coastal erosion. *Climatic Change*, 64: 41-58.

## Anexo 3.I

Descrição da análise de comparação entre os dados dos dois pontos escolhidos (referência 1048047 e 1049047) dos conjuntos dos SIMAR-44 e WANA e os dados da boia de Faro.

Para esta análise, foram utilizados os dados de agitação marítima dos dois pontos com referências 1048047 e 1049047 dos conjuntos SIMAR-44 e WANA e da boia de Faro para o período desde o dia 01 de novembro de 1995 ao dia 30 de dezembro de 2001. Este período foi considerado por ser o intervalo que apresenta menor número de lacunas ao longo da série temporal total. Das matrizes resultantes foram extraídos os casos para os quais se verifica que a altura significativa ( $H_s$ ) da boia de Faro é igual ou superior a 2,5 m. As matrizes resultantes desta extração foram subdivididas consoante a direção de agitação marítima dos registos da boia de Faro: O-SO casos de ondulação com direção predominante de oeste e sudoeste (Figuras A3.I.1. e A3.I.2; Tabela A3.I.1) e E-SE casos de ondulação com direção predominante de este e sudeste (Figuras A3.I.3. e A3.I.4; Tabela A3.I.1).

Pela análise dos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) pode verificar-se que os valores modelados do ponto com referência 1049047 (Figuras A3.I.2. e A3.I.4) descrevem melhor os valores registados da boia de Faro, uma vez que a percentagem dos valores modelados que descreve as variações dos dados da boia de Faro é sempre maior neste ponto para todos os modelos (Tabela A3.I.1). Pela análise dos valores da raiz do erro quadrático médio (RMSE – *Root Mean Square Error*) pode verificar-se que também é para os casos do ponto com referência 1049047 (Figuras A3.I.2. e A3.I.4) que as retas apresentam os melhores ajustes, pois assumem menores valores de RMSE, ou seja, os desvios/erros quadrados (distância entre cada valor correlacionado e as respetivas retas lineares) são menores neste ponto para todos os modelos (Tabela A3.I.1). De acordo com estes resultados assumiu-se os dados dos conjuntos SIMAR-44 e WANA do ponto com referência 1049047 para análise neste trabalho.

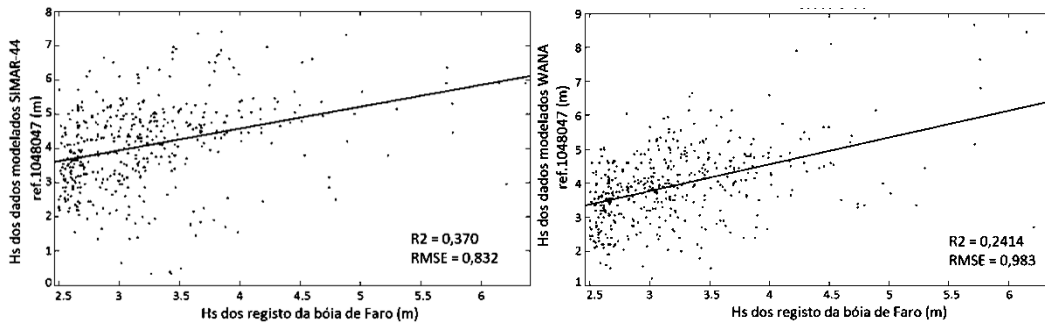


Figura A3.I.1. Correlação da altura significativa das ondas entre os dados modelados do ponto 1048047 SIMAR-44 e os registos da boia de Faro (**esquerda**) e entre os dados modelados do ponto 1048047 WANA e os registos da boia de Faro (**direita**), para os casos em que a altura significativa da boia de Faro é igual ou superior a 2,5 m e as direções de onda de O-SO.

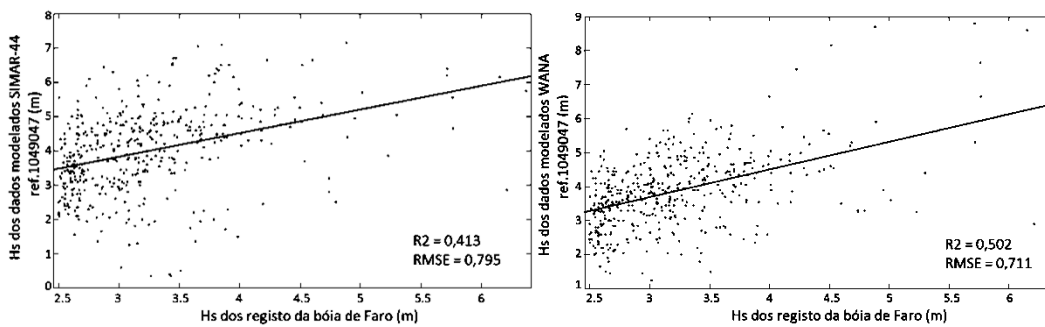


Figura A3.I.2. Correlação da altura significativa das ondas entre os dados modelados do ponto 1049047 SIMAR-44 e os registos da boia de Faro (**esquerda**) e entre os dados modelados do ponto 1049047 WANA e os registos da boia de Faro (**direita**), para os casos em que a altura significativa da boia de Faro é igual ou superior a 2,5 m e as direções de onda de O-SO.

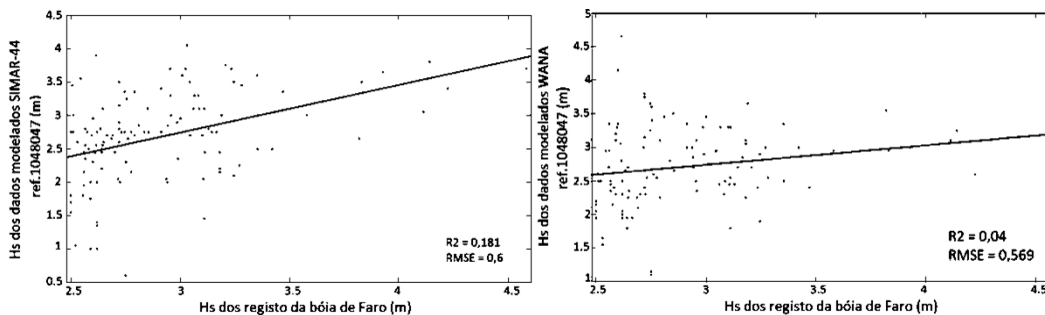


Figura A3.I.3. Correlação da altura significativa das ondas entre os dados modelados do ponto 1048047 SIMAR-44 e os registos da boia de Faro (**esquerda**) e entre os dados modelados do ponto 1048047 WANA e os registos da boia de Faro (**direita**), para os casos em que a altura significativa da boia de Faro é igual ou superior a 2,5 m e as direções de onda de E-SE.

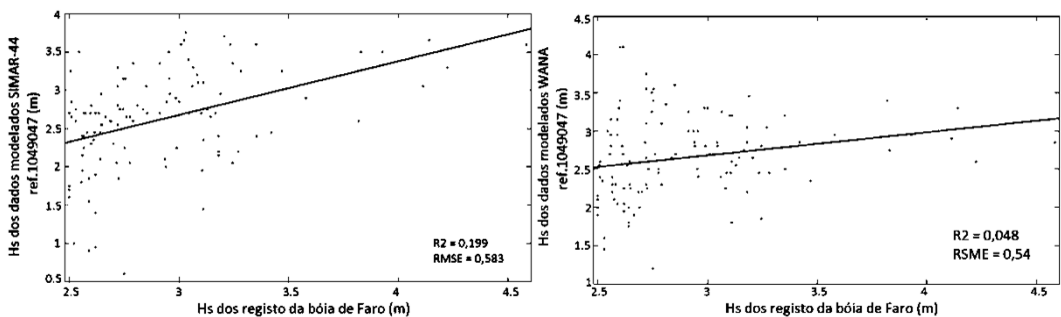


Figura A3.I.4. Correlação da altura significativa das ondas entre os dados modelados do ponto 1049047 SIMAR-44 e os registos da boia de Faro (**esquerda**) e entre os dados modelados do ponto 1049047 WANA e os registos da boia de Faro (**direita**), para os casos em que a altura significativa da boia de Faro é igual ou superior a 2,5 m e as direções de onda de E-SE.

Tabela A3.I.1 Valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e da raiz do erro quadrático médio (RMSE – *Root Mean Square Error*) das retas de regressão lineares das correlações entre os dados de Hs modelados dos dois pontos dos conjuntos SIMAR-44 e WANA e medidos pela boia de Faro.

		Hs ≥ 2,5 m			
		O-SO		E-SE	
		SIMAR-44/Faro	WANA/Faro	SIMAR-44/Faro	WANA/Faro
Ponto	$R^2$	0.37 = 37%	0.21 = 21%	0.18 = 18%	0.04 = 4%
Ref.1048047	RMSE	0.83	0.98	0.60	0.57
	(m)				
Ponto	$R^2$	0.41 = 41%	0.50 = 50%	0.20 = 20%	0.05 = 5%
Ref.1049047	RMSE	0.80	0.71	0.58	0.54
	(m)				

## Anexo 3.II

Descrição dos resultados das correlações entre os dados (período e direção da onda) modelados SIMAR-44 e WANA e os registos da boia ondógrafo de Faro:

❖ Casos em que a altura significativa da boia de Faro é inferior a 2,5 m:

Os gráficos representativos das correlações entre as medições dos períodos de pico da boia de Faro e os valores modelados de SIMAR-44 e WANA (Figura A3.II.1.) evidenciam elevada dispersão não sendo possível estabelecer uma função de minimização dos erros. Por conseguinte, os dados modelados tanto de SIMAR-44 como de WANA foram utilizados diretamente para colmatar as lacunas dos dados da boia de Faro, tendo em conta sempre o erro associado.

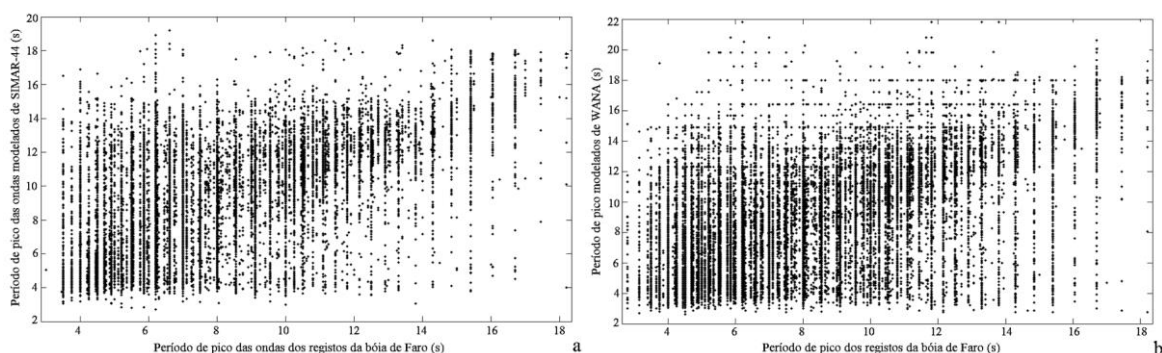


Figura A3.II.1. Correlação dos períodos de pico das ondas entre os dados modelados de SIMAR-44 e os registos da boia de Faro (a) e entre os dados modelados de WANA e os registos da boia de Faro (b), para os casos em que a altura significativa da boia de Faro é inferior a 2,5 m.

Para ondas com direção de sudoeste (nuvem de pontos próxima de  $270^\circ$  na Figura A3.II.2. a) existe uma boa correlação entre os dados modelados de SIMAR-44 e os registos da boia de Faro, mas para ondas de sudeste o modelo sobrestima assumindo valores com direções desde os  $130$  a  $270^\circ$  (Figura A3.II.2. a). A distribuição da correlação entre os dados modelados WANA e os registos da boia de Faro é similar a esta, mas os erros aumentam para as direções de sudoeste, para as quais o modelo subestima e assume valores como se fossem de direções de sul ou sudeste ( $130$  a  $150^\circ$ ; Figura A3.II.2. b). De acordo com estas observações não é possível obter diretamente uma função de transferência para ajuste dos dados modelados aos dados registados, assim os dados modelados tanto de SIMAR-44 como de WANA foram

utilizados diretamente para colmatar as lacunas dos dados da boia de Faro, tendo em conta que o erro associado será sempre menor para ondas de O e de SO.

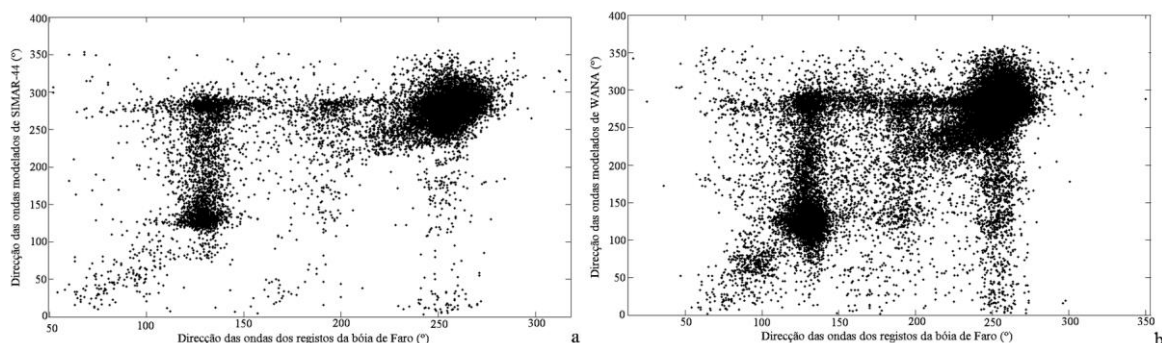


Figura A3.II.2. Correlação das direções das ondas entre os dados modelados de SIMAR-44 e os registos da boia de Faro (a) e entre os dados modelados de WANA e os registos da boia de Faro (b), para os casos em que a altura significativa da boia de Faro é inferior a 2,5 m.

❖ Casos em que a altura significativa da boia de Faro é igual ou superior a 2,5 m:

Das correlações entre os dados de período de pico da boia de Faro e de SIMAR-44 e WANA observa-se que, apesar de alguma dispersão entre os dados, ambos os modelos apresentam previsões bastante razoáveis para os casos de ondas de direção de Oeste-Sudoeste (O-SO) (Figura A3.II.3. a e c). Para ondas de Este-Sudeste (E-SE) as correlações evidenciam que os modelos apresentam previsões fracas, com elevada dispersão (Figura A3.II.3. b e d). Assim, os dados utilizados para preencher as lacunas da boia de Faro foram os dados originais sem qualquer ajuste, tendo em conta que o erro associado será sempre menor para ondas de O e de SO.

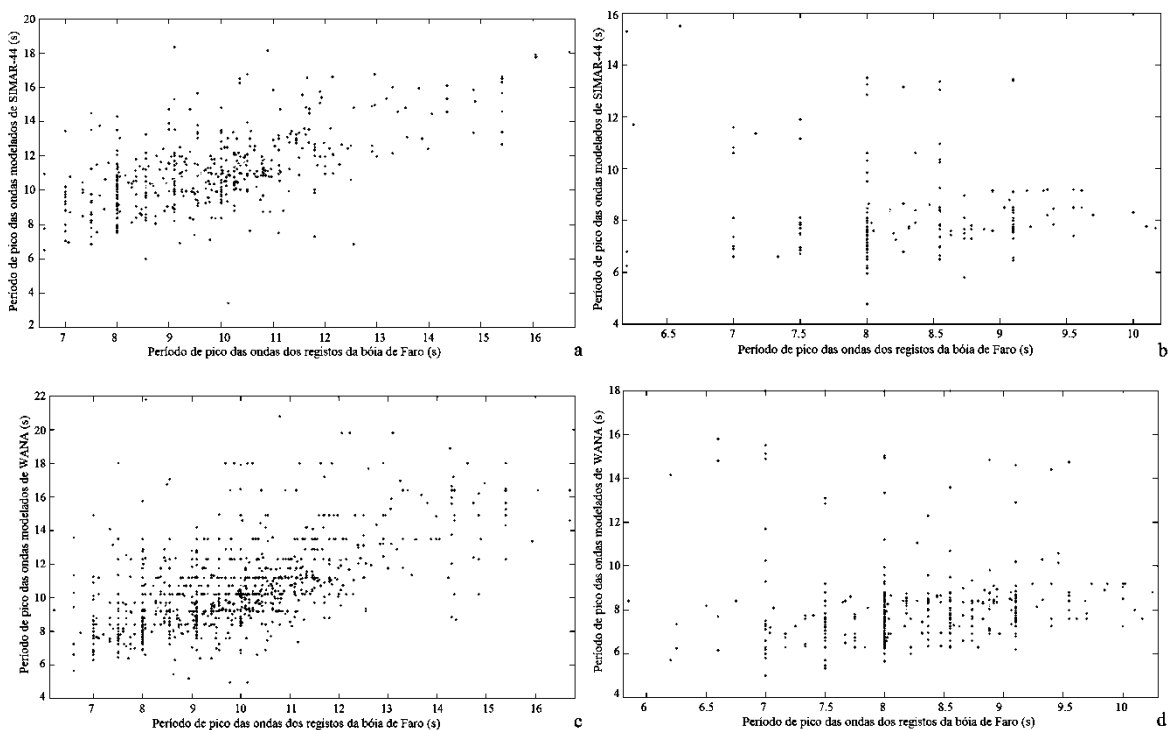


Figura A3.II.3. Correlação dos períodos de pico entre os dados modelados de SIMAR-44 e os registos da boia de Faro de Oeste-Sudoeste (O-SO) **(a)** e de Este-Sudeste (E-SE) **(b)** e entre os dados modelados de WANA e os registos da boia de Faro de O-SO **(c)** e de E-SE **(d)**, para os casos em que a altura significativa da boia de Faro é igual ou superior a 2,5 m.

Relativamente às correlações entre a direção das ondas dos registos da boia de Faro e a direção das ondas dos dados modelados de SIMAR-44 e WANA, verifica-se que ambos os modelos apresentam previsões razoáveis, tanto para ondas de O-SO (Figura A3.II.4. **a** e **c**) como para ondas de E-SE (Figura A3.II.4. **b** e **d**). Os dados modelados de SIMAR-44 mostram maior dispersão para casos de O-SO (Figura A3.II.4. **a**) e os dados modelados de WANA mostram maior dispersão para casos de E-SE (Figura A3.II.4. **d**). Uma vez que não é fácil corrigir estes erros de forma direta, os dados utilizados para preencher as lacunas dos dados da boia de Faro foram os originais.

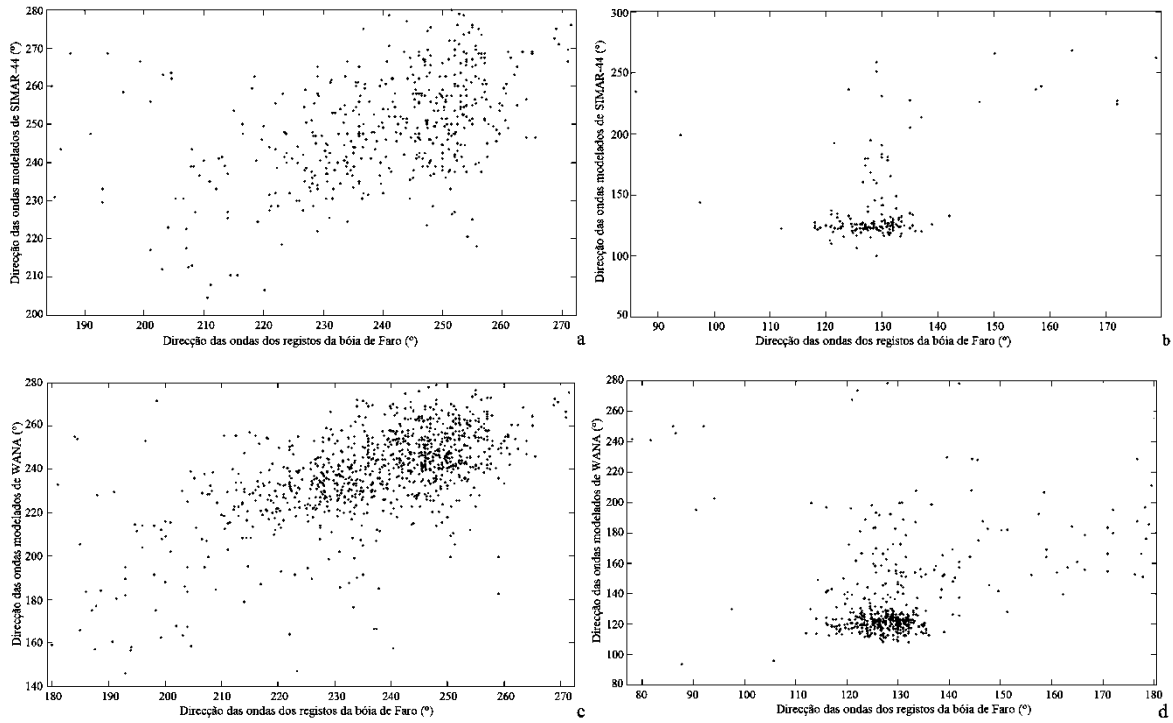


Figura A3.II.4. Correlação das direções de onda entre os dados modelados de SIMAR-44 e os registos da boia de Faro de Oeste-Sudoeste (O-SO) **(a)** e de Este-Sudeste (E-SE) **(b)** e entre os dados modelados de WANA e os registos da boia de Faro de O-SO **(c)** e de E-SE **(d)**, para os casos em que a altura significativa da boia é igual ou superior a 2,5 m.

## Anexo 3.III

tabela A3.III.1 Matriz com dados dos eventos de tempestade de sudoeste a utilizar para aplicação de análise probabilística do flanco ocidental (Península do Ancão e Ilha da Barreta). As colunas com Ano, Mês, Dia e Hora, Minutos e Segundos remetem à data inicial de cada tempestade. Dur corresponde às horas de duração de cada tempestade. NivM\_max é o nível do mar máximo observado durante cada tempestade. Hs e Tp correspondem, respetivamente, à altura significativa das ondas e ao período de pico que ocorrem no exato momento em que ocorre o NivM\_max. AngIncid Ancão e AngIncid Barreta indicam aos ângulos de incidência de cada tempestade, calculados a partir da subtração do ângulo de direção da onda, no momento em que ocorre o NivM\_max, ao ângulo de orientação da costa de cada área (Ancão: 216,18° e Barreta: 196,31°).

Ano	Mês	Dia	Hora	Minutos	Segundos	Dur (h)	NivM_max (m)	Hs (m)	Tp (s)	AngIncid Ancão (°)	AngIncid Barreta (°)
1993	2	27	11	00	00	12	0,54	3,50	6	114	134
1993	10	5	11	00	00	24	0,81	3,50	7	47	67
1993	10	9	23	00	00	168	1,53	3,87	8	20	40
1993	10	30	14	00	00	165	1,29	3,17	7	21	41
1993	11	30	8	00	00	9	0,71	3,36	9	52	72
1994	1	5	17	00	00	47	0,59	3,64	7	50	70
1994	1	9	17	00	00	39	0,98	3,61	16	59	79
1994	2	15	15	00	00	26	0,97	2,71	8	6	14
1994	2	26	9	00	00	58	1,53	3,27	8	34	54
1994	4	22	8	00	00	18	0,94	3,33	10	27	47
1994	11	4	3	00	00	68	1,38	3,50	14	56	76
1994	11	8	21	00	00	20	1,04	4,02	9	37	57
1994	12	1	3	00	00	35	1,37	4,22	10	2	22
1994	12	31	23	00	00	12	1,24	3,51	7	47	67
1995	1	17	15	00	00	71	1,00	3,28	8	47	67
1995	11	10	19	00	00	39	1,15	2,60	10	14	6
1995	12	11	3	00	00	8	0,86	3,80	9	30	10
1995	12	19	3	00	00	95	1,27	2,55	10	41	61
1995	12	25	22	00	00	10	1,33	2,62	9	33	53
1995	12	29	7	00	00	87	0,84	2,59	7	24	44
1996	1	6	6	00	00	145	1,18	2,80	11	42	62
1996	1	20	15	00	00	88	1,85	3,16	10	4	24
1996	1	27	6	00	00	68	0,98	4,79	9	9	11
1996	1	31	17	00	00	29	1,15	5,22	10	32	52
1996	2	5	18	00	00	28	1,00	4,01	8	57	77
1996	3	24	2	00	00	26	0,79	2,73	13	35	55

1996	4	1	6	00	00	12	0,88	3,09	8	47	67
1996	5	6	6	00	00	25	1,30	3,38	10	30	50
1996	11	11	6	00	00	48	1,34	3,18	9	27	47
1996	12	10	18	00	00	89	1,45	3,53	11	25	45
1996	12	17	16	00	00	181	1,52	4,53	12	9	29
1996	12	26	23	00	00	112	1,16	3,39	9	20	40
1997	1	7	22	00	00	19	1,43	2,61	9	38	58
1997	6	5	5	00	00	9	0,90	2,57	9	39	59
1997	10	6	4	00	00	15	1,07	3,09	9	30	10
1997	10	20	20	00	00	8	0,36	2,50	10	38	58
1997	11	2	22	00	00	111	1,16	2,54	7	25	45
1997	11	24	9	00	00	49	0,86	3,44	8	20	40
1997	12	15	22	00	00	102	1,37	3,30	10	30	50
1998	1	11	3	00	00	59	1,19	3,39	8	6	14
1998	1	30	22	00	00	117	1,37	3,92	9	21	1
1998	5	11	11	00	00	16	1,02	3,83	11	29	49
1998	12	29	12	00	00	70	1,14	3,56	7	29	49
1999	1	5	0	00	00	20	1,01	2,54	12	43	63
1999	3	10	11	00	00	78	0,63	3,82	11	23	43
1999	9	19	5	00	00	16	0,54	3,30	8	29	49
1999	10	17	20	00	00	170	1,41	3,37	11	41	61
1999	12	15	3	00	00	16	0,58	3,13	8	39	59
2000	4	1	20	00	00	37	1,12	3,22	10	23	43
2000	4	8	5	00	00	37	1,22	2,86	8	25	5
2000	4	13	23	00	00	68	0,94	2,53	8	5	25
2000	11	28	0	00	00	135	0,97	2,84	12	35	55
2000	12	6	19	00	00	49	0,92	4,34	10	35	55
2000	12	19	15	00	00	221	1,31	3,59	9	21	41
2001	1	11	14	00	00	25	1,04	2,50	8	15	35
2001	2	6	18	00	00	46	1,31	3,15	8	10	30
2001	3	1	18	00	00	81	0,93	4,19	9	9	29
2001	3	6	11	00	00	33	0,98	2,77	13	28	48
2002	1	2	12	00	00	7	1,10	2,55	10	17	37
2002	1	23	10	00	00	6	0,46	2,53	7	7	27
2002	3	3	21	00	00	13	1,08	3,19	10	1	19
2002	3	12	9	00	00	55	1,03	3,38	9	27	47
2002	4	7	7	00	00	8	0,69	2,85	8	9	29

2002	9	17	11	00	00	12	0,91	2,50	7	7	27
2002	10	20	12	00	00	30	1,27	2,87	11	25	45
2002	11	13	14	00	00	38	0,91	3,31	9	20	40
2002	11	24	6	00	00	12	0,81	2,56	10	33	53
2002	12	14	2	00	00	17	0,61	2,94	10	9	11
2002	12	17	4	00	00	48	1,06	2,57	11	30	50
2002	12	26	23	00	00	27	0,95	3,50	8	34	54
2003	1	20	18	00	00	12	1,17	2,58	9	18	38
2003	2	18	17	00	00	116	1,36	3,66	11	33	53
2003	2	26	17	00	00	12	0,69	2,72	8	31	51
2003	3	10	0	00	00	6	0,11	2,61	12	27	7
2003	3	27	9	00	00	68	1,00	2,97	9	29	49
2003	4	13	10	00	00	33	0,98	2,68	14	29	49
2003	4	22	11	00	00	216	1,78	3,06	8	35	15
2003	11	15	13	00	00	6	0,48	2,50	9	31	51
2003	12	6	10	00	00	12	1,01	2,88	9	17	3
2003	12	9	15	00	00	12	0,89	2,50	10	44	64
2004	2	22	13	00	00	103	1,39	2,60	9	3	17
2004	4	1	1	00	00	31	0,69	3,18	8	39	59
2004	10	18	19	00	00	45	0,83	2,81	10	32	52
2004	10	27	7	00	00	13	1,11	2,92	9	17	37
2004	12	13	4	00	00	22	1,04	2,50	10	0	20
2005	3	26	1	00	00	24	1,09	2,76	13	37	57
2005	10	11	7	00	00	7	0,92	4,16	11	0	20
2005	10	27	11	00	00	14	0,72	2,53	8	5	25
2005	11	21	13	00	00	8	0,53	3,10	10	3	23
2005	12	2	2	00	00	10	1,14	2,61	7	30	50
2006	1	26	8	00	00	6	0,59	2,71	10	21	41
2006	2	18	22	00	00	9	0,64	2,63	8	41	61
2006	3	4	12	00	00	10	0,89	2,77	8	35	55
2006	3	17	14	00	00	16	1,06	2,58	13	36	56
2006	10	18	1	00	00	17	0,97	2,53	9	40	60
2006	10	25	2	00	00	91	1,23	2,81	9	28	48
2006	11	15	19	00	00	15	0,86	2,81	8	24	44
2006	11	24	8	00	00	36	1,07	3,76	11	27	47
2007	2	16	14	00	00	6	1,03	2,79	8	25	5
2007	11	20	4	00	00	19	1,07	2,57	8	24	44

2007	12	20	13	00	00	30	0,99	2,81	8	34	14
2008	1	2	14	00	00	34	0,52	2,50	9	20	40
2008	4	7	17	00	00	87	1,38	3,42	10	12	32
2008	4	17	0	00	00	92	1,15	2,92	8	30	50
2008	12	31	16	00	00	6	0,74	2,54	10	33	53
2009	1	30	16	00	00	66	1,11	4,75	9	1	21
2009	2	4	8	00	00	59	0,92	2,92	12	17	37
2009	12	16	17	00	00	75	1,04	3,58	11	16	36
2009	12	21	1	00	00	141	1,22	3,33	9	0	20
2009	12	28	5	00	00	102	1,35	4,13	13	29	49
2010	1	4	12	00	00	37	1,29	4,82	13	40	60
2010	1	10	21	00	00	95	0,92	3,98	9	44	64
2010	2	8	17	00	00	15	0,50	3,43	7	49	69
2010	2	15	12	00	00	55	1,38	3,66	12	14	34
2010	2	20	0	00	00	76	1,03	3,81	10	1	21
2010	2	27	15	00	00	29	1,48	3,60	10	30	50
2010	3	2	23	00	00	35	1,60	4,05	14	29	49
2010	3	8	23	00	00	8	0,47	2,61	7	42	62
2010	4	15	4	00	00	30	1,14	3,27	12	11	31
2010	10	9	2	00	00	8	1,35	2,51	9	19	39
2010	11	30	22	00	00	15	0,91	2,89	9	29	49
2010	12	5	13	00	00	76	1,29	3,68	12	31	51
2010	12	18	15	00	00	27	0,91	3,64	11	7	27
2010	12	20	23	00	00	65	1,30	3,41	10	15	35
2010	12	29	13	00	00	22	0,82	3,40	10	1	19
2011	2	15	1	00	00	33	1,10	2,90	13	25	45
2011	10	23	0	00	00	111	1,48	3,37	10	28	48
2011	11	3	5	00	00	51	0,76	2,94	14	23	43
2011	11	13	6	00	00	20	0,83	2,53	9	30	50

Tabela A3.III.2 Matriz com dados dos eventos de tempestade de sudeste a utilizar para aplicação de análise probabilística do flanco oriental (Ilhas da Culatra e Armona). As colunas com Ano, Mês, Dia e Hora, Minutos e Segundos remetem à data inicial de cada tempestade. Dur corresponde às horas de duração de cada tempestade. NivM\_max é o nível do mar máximo observado durante cada tempestade. Hs e Tp correspondem, respetivamente, à altura significativa das ondas e ao período de pico que ocorrem no exato momento em que ocorre o NivM\_max. AngIncid Culatra e AngIncid Armona indicam aos ângulos de incidência de cada tempestade, calculados a partir da subtração do ângulo de direção da onda, no momento em que ocorre o NivM\_max, ao ângulo de orientação da costa de cada área (Culatra: 146,12° e Armona: 142,99°).

Ano	Mês	Dia	Hora	Min.	Seg.	Dur	NivM_max	Hs	Tp	AngIncid	AngIncid
						(h)	(m)	(m)	(s)	Culatra (°)	Armona (°)
1993	3	17	4	00	00	9	0,36	2,57	8	21	18
1995	3	22	5	00	00	37	0,82	3,25	8	18	14
1995	3	30	22	00	00	66	1,11	3,41	9	16	13
1995	5	5	1	00	00	29	0,61	2,67	9	19	16
1995	11	6	10	00	00	22	0,93	2,52	8	14	11
1995	12	10	20	00	00	7	0,34	3,35	8	34	38
1996	1	31	10	00	00	7	0,63	2,56	7	6	9
1996	3	5	12	00	00	28	0,93	3,21	8	17	14
1996	3	8	11	00	00	6	1,03	2,60	7	21	18
1996	3	10	14	00	00	7	0,87	3,05	7	6	9
1996	12	27	13	00	00	9	0,93	3,06	9	9	13
1997	1	13	5	00	00	28	1,40	2,63	8	18	15
1997	2	8	3	00	00	23	1,18	2,56	7	20	17
1997	3	9	1	00	00	39	1,51	2,86	8	15	12
1997	3	26	23	00	00	29	1,09	2,94	9	14	11
1997	5	1	7	00	00	11	0,66	3,14	9	12	9
1998	1	9	19	00	00	32	1,07	2,67	8	31	34
1998	2	7	16	00	00	143	1,07	2,95	8	7	4
1998	2	19	6	00	00	20	0,51	3,02	8	23	20
1999	1	11	20	00	00	6	0,45	2,59	7	53	50
1999	11	28	2	00	00	80	0,77	2,55	7	28	25
2000	4	7	4	00	00	25	1,30	4,06	10	17	14
2000	12	19	9	00	00	6	0,66	2,58	6	15	18
2001	2	19	20	00	00	14	0,69	3,33	9	20	17
2001	10	29	3	00	00	11	1,08	2,50	8	23	20

2001	12	9	7	00	00	76	0,99	2,75	7	21	18
2001	12	17	3	00	00	31	1,13	3,05	9	21	18
2002	1	1	13	00	00	23	1,37	3,72	8	19	16
2002	1	5	7	00	00	45	0,94	2,54	8	22	19
2002	3	27	22	00	00	16	1,43	2,99	9	21	18
2002	10	19	14	00	00	17	1,10	3,46	9	28	25
2002	12	13	9	00	00	17	0,74	3,39	8	9	5
2003	3	11	6	00	00	13	0,37	2,59	10	5	9
2003	3	16	5	00	00	57	1,43	3,41	9	31	28
2003	3	24	4	00	00	19	0,77	2,59	8	22	18
2003	10	25	3	00	00	11	1,67	3,09	8	32	35
2004	12	12	15	00	00	18	1,20	2,71	7	11	14
2005	2	27	14	00	00	32	1,01	2,80	7	58	55
2005	3	17	20	00	00	36	0,43	2,58	8	24	20
2005	4	6	5	00	00	9	0,97	2,55	9	17	14
2005	6	8	1	00	00	6	0,76	2,70	8	20	17
2005	11	19	23	00	00	38	1,01	3,41	8	8	5
2005	12	22	11	00	00	14	0,45	3,26	8	27	23
2006	1	24	16	00	00	78	0,68	3,48	8	21	18
2007	12	18	14	00	00	76	1,00	2,69	8	21	24
2008	2	9	1	00	00	128	1,21	2,81	9	17	14
2008	2	16	17	00	00	36	0,87	2,93	8	32	29
2008	2	22	9	00	00	38	1,16	3,38	9	23	19
2008	3	5	1	00	00	14	0,63	2,53	7	52	49
2008	12	30	13	00	00	21	0,79	2,75	8	16	13
2009	2	26	2	00	00	14	0,95	2,51	8	13	10
2009	3	16	22	00	00	49	0,59	3,66	9	18	15
2009	3	23	2	00	00	6	0,46	2,56	7	21	18
2009	5	28	19	00	00	14	0,72	2,55	8	20	17
2010	2	3	15	00	00	7	1,04	2,59	8	19	15
2010	2	27	12	00	00	75	1,53	2,76	7	21	24
2010	4	9	0	00	00	26	0,76	2,53	8	23	20
2010	12	4	15	00	00	22	1,21	2,76	8	21	18
2010	12	10	16	00	00	22	1,02	2,61	8	15	12
2010	12	29	11	00	00	15	0,72	2,87	8	17	20
2011	1	21	0	00	00	104	1,42	2,73	9	16	13
2011	3	7	20	00	00	12	1,11	2,89	8	22	19

<b>2011</b>	3	22	0	00	00	55	1,05	2,57	8	20	17
<b>2011</b>	4	5	21	00	00	14	0,94	2,97	9	17	14
<b>2011</b>	4	16	21	00	00	44	1,43	2,84	8	16	13
<b>2011</b>	5	10	0	00	00	7	0,18	2,53	8	14	10
<b>2011</b>	5	15	0	00	00	19	1,11	2,78	8	12	9
<b>2011</b>	11	12	13	00	00	44	1,16	2,82	8	7	4
<b>2012</b>	3	23	3	00	00	7	0,77	2,50	7	19	15
<b>2012</b>	3	26	23	00	00	57	0,70	2,52	8	13	10

## Anexo 4.I

Comparação entre a aplicação da função de distribuição de probabilidade Fisher-Tippet I: Gumbel e da de FT III: Weibull aos resultados de máximos anuais de Rhigh:

Todo este procedimento foi realizado com base nos dados de agitação marítima e de nível do mar totais, ou seja, sem separação entre O-SO e E-SE. A função de distribuição de probabilidade com melhores resultados obtida desta análise foi considerada representativa para as análises efetuadas posteriormente que, nomeadamente, tiverem em conta a separação da base de dados entre direções de onda de O-SO e E-SE.

Tabela A4.I.1 Máximos anuais de Rhigh por classes de pendur ([0.06-0.07]; [0.08-0.09]; [0.10-0.11]; [0.12-0.13]; [0.14-0.15]; [0.16-0.77]).

Ano	Classes de pendur de face de praia					
	[0,06-0,07]	[0,08-0,09]	[0,10-0,11]	[0,12-0,13]	[0,14-0,15]	[0,16-0,17]
1993	3,65	4,14	4,63	5,12	5,61	6,10
1994	3,98	4,62	5,26	5,89	6,53	7,17
1995	3,26	3,69	4,12	4,55	4,98	5,41
1996	4,78	5,36	5,94	6,52	7,10	7,68
1997	3,90	4,38	4,87	5,35	5,84	6,32
1998	4,26	4,83	5,41	6,09	6,79	7,50
1999	4,30	5,04	5,78	6,52	7,26	8,01
2000	4,49	5,17	5,85	6,53	7,21	7,89
2001	3,38	3,82	4,27	4,71	5,15	5,60
2002	3,46	3,95	4,44	4,93	5,42	5,91
2003	4,53	5,21	5,89	6,56	7,24	7,92
2004	3,08	3,38	3,69	4,06	4,48	4,90
2005	3,37	3,84	4,31	4,83	5,39	5,95
2006	3,44	3,89	4,34	4,82	5,31	5,79
2007	3,54	4,01	4,48	4,94	5,41	5,88
2008	3,71	4,21	4,71	5,21	5,71	6,21
2009	4,11	4,66	5,26	5,90	6,55	7,19
2010	4,57	5,16	5,75	6,34	6,95	7,55
2011	3,62	4,00	4,44	4,94	5,44	5,94
2012	2,40	2,74	3,08	3,43	3,77	4,11

Aos resultados dos máximos anuais de Rhigh para as diferentes classes de pendur (Tabela A4.I.1) foram ajustadas duas funções de distribuição de probabilidade: FT I: Gumbel e FT

III: Weibull através da ferramenta de distribuição de ajuste “*dfittool*” disponível em MATLAB.

De acordo com os resultados de média e variância dos máximos anuais de Rhigh por classe de pendor determinados de acordo com as respectivas equações ( $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$  e  $s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i^2) - n\bar{x}^2}{(n-1)}$ ) e dos valores de média e variância resultantes das distribuições de probabilidade Gumbel e Weibull (Tabela A4.I.2) pode verificar-se que a distribuição que apresenta valores mais aproximados é a de Weibull.

Tabela A4.I.2 Valores de média e variância dos máximos anuais de Rhigh por classe de pendor e resultantes da aplicação das distribuições de Gumbel e Weibull.

Máximos anuais de Righ por classe de pendor	$\bar{x}$		$s^2$		Gumbel		Weibull	
	média	variância	média	variância	média	variância	média	variância
0.06-0.07	3,79	0,35	3,77	0,44	3,79	0,35		
0.08-0.09	4,31	0,48	4,29	0,58	4,31	0,47		
0.10-0.11	4,83	0,63	4,81	0,76	4,83	0,62		
0.12-0.13	5,36	0,80	5,35	0,96	5,37	0,78		
0.14-0.15	5,91	1,00	5,89	1,19	5,91	0,97		
0.16-0.17	6,45	1,21	6,44	1,46	6,46	1,18		

Pela observação dos gráficos com representação das retas de ajuste aos dados das distribuições de Gumbel e Weibull (Figuras A4.I.1, A4.I.12 e A4.I.13) também é possível observar um melhor ajuste da distribuição de Weibull em relação à de Gumbel.

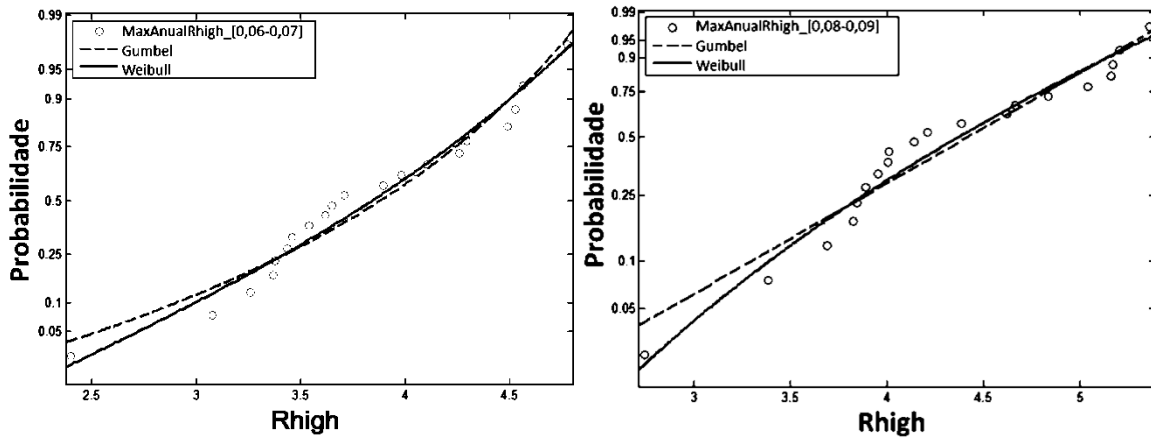
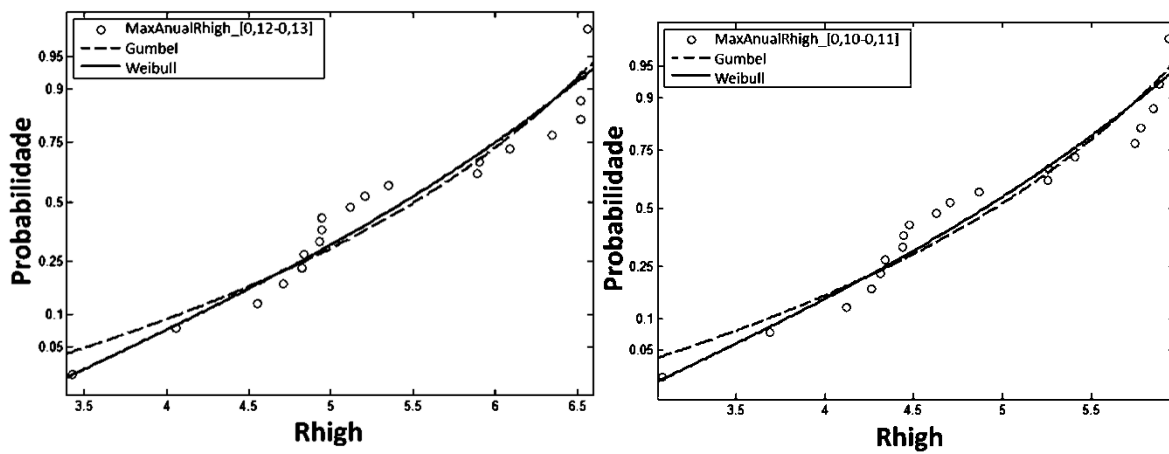
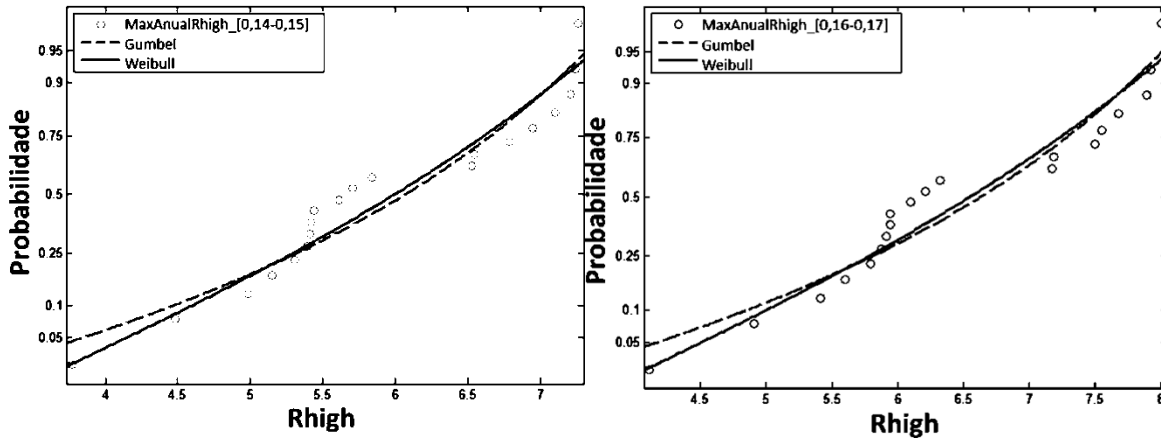


Figura A4.I.1 Gráficos com distribuição de probabilidade dos máximos anuais de Rhigh para as classes de pendor [0.06-0.07] (esquerda) e [0.08-0.09] (direita) com representação das retas de ajuste das distribuições de Gumbel (linha tracejada) e Weibull (linha contínua).



Figuras A4.I.2 Gráficos com distribuição de probabilidade dos máximos anuais de Rhigh para as classes de pendor [0.10-0.11] (esquerda) e [0.12-0.13] (direita) com representação das retas de ajuste das distribuições de Gumbel (linha tracejada) e Weibull (linha contínua).



Figuras A4.I.3 Gráficos com distribuição de probabilidade dos máximos anuais de Rhigh para as classes de pendor [0.14-0.15] (esquerda) e [0.16-0.17] (direita) com representação das retas de ajuste das distribuições de Gumbel (linha tracejada) e Weibull (linha contínua).

## Anexo 4.II

Tabela A4.II.1 Máximos anuais de Rhigh (m), desde 1993 a 2012, para condições de E-SE por classe de pendor de face de praia.

Ano	Classes de pendor de face de praia					
	[0,06-0,07]	[0,08-0,09]	[0,10-0,11]	[0,12-0,13]	[0,14-0,15]	[0,16-0,17]
1993	2,47	2,64	2,82	2,99	3,27	3,54
1994	2,62	2,89	3,32	3,75	4,18	4,61
1995	3,08	3,47	3,86	4,25	4,64	5,04
1996	2,64	2,97	3,30	3,63	3,96	4,29
1997	3,07	3,39	3,71	4,03	4,35	4,67
1998	2,75	3,09	3,60	4,12	4,63	5,15
1999	2,32	2,54	2,77	3,02	3,27	3,52
2000	3,68	4,11	4,54	4,96	5,39	5,82
2001	3,38	3,82	4,27	4,71	5,15	5,60
2002	3,35	3,68	4,01	4,34	4,67	5,00
2003	4,05	4,53	5,01	5,49	5,96	6,44
2004	2,58	2,82	3,07	3,32	3,56	3,81
2005	2,80	3,14	3,50	3,86	4,22	4,58
2006	2,76	2,97	3,25	3,60	3,95	4,31
2007	3,54	4,01	4,48	4,94	5,41	5,88
2008	2,97	3,29	3,62	3,94	4,32	4,72
2009	2,53	2,90	3,26	3,62	3,98	4,35
2010	3,02	3,27	3,53	3,78	4,03	4,29
2011	3,34	3,69	4,04	4,39	4,73	5,08
2012	2,23	2,50	2,77	3,03	3,30	3,57
Média	2,96	3,29	3,64	3,99	4,35	4,71

Tabela A4.II.2 Máximos anuais de Rhigh (m), desde 1993 a 2012, para condições de O-SO por classe de pendora de face de praia.

Ano	Classes de pendora de face de praia					
	[0,06-0,07]	[0,08-0,09]	[0,10-0,11]	[0,12-0,13]	[0,14-0,15]	[0,16-0,17]
1993	3,65	4,14	4,63	5,12	5,61	6,10
1994	3,98	4,62	5,26	5,89	6,53	7,17
1995	3,26	3,69	4,12	4,55	4,98	5,41
1996	4,78	5,36	5,94	6,52	7,10	7,68
1997	3,90	4,38	4,87	5,35	5,84	6,32
1998	4,26	4,83	5,41	6,09	6,79	7,50
1999	4,30	5,04	5,78	6,52	7,26	8,01
2000	4,49	5,17	5,85	6,53	7,21	7,89
2001	3,28	3,65	4,10	4,55	5,00	5,45
2002	3,46	3,95	4,44	4,93	5,42	5,91
2003	4,53	5,21	5,89	6,56	7,24	7,92
2004	3,08	3,38	3,69	4,06	4,48	4,90
2005	3,37	3,84	4,31	4,83	5,39	5,95
2006	3,44	3,89	4,34	4,82	5,31	5,79
2007	2,65	3,02	3,39	3,76	4,13	4,50
2008	3,71	4,21	4,71	5,21	5,71	6,21
2009	4,11	4,66	5,26	5,90	6,55	7,19
2010	4,57	5,16	5,75	6,34	6,95	7,55
2011	3,62	4,00	4,44	4,94	5,44	5,94
2012	2,20	2,52	2,84	3,16	3,48	3,80
Média	3,73	4,24	4,75	5,28	5,82	6,36