

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/350767443>

Análise de eventos de risco através de modelação numérica XBeach. Caso de Estudo – Costa da Caparica.

Article in *Revista Recursos Hídricos* · December 2020

DOI: 10.5894/rh41n2-cti4

CITATIONS

0

4 authors:



Andreia Marques Ferreira

National Laboratory for Civil Engineering

4 PUBLICATIONS 1 CITATION

[SEE PROFILE](#)



Maria Teresa Reis

National Laboratory for Civil Engineering

155 PUBLICATIONS 714 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

READS

10



Conceição Juana Fortes

National Laboratory for Civil Engineering

252 PUBLICATIONS 762 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Juan L. Garzon

Universidade do Algarve

12 PUBLICATIONS 80 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



INFRARISK - Risk Analysis and Mitigation in Infrastructures [View project](#)



HYDRALAB [View project](#)

Análise de eventos de risco através de modelação numérica XBeach. Caso de Estudo – Costa da Caparica

Risk events analysis by XBeach numerical modeling. Case study – Costa da Caparica

Andreia Marques FERREIRA¹, Conceição J.E.M. FORTES¹, Maria Teresa REIS¹, Juan L. GARZON²

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, aferreira@lnec.pt, jfortes@lnec.pt, treis@lnec.pt

² CIMA/FCT, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, jlhervas@ualg.pt

RESUMO: É cada vez mais usual o recurso à modelação numérica para a simulação de eventos de galgamento, inundação e erosão em zonas costeiras. Neste estudo, recorre-se ao acoplamento de dois modelos, SWAN + XBeach (modo *surf beat*), para a propagação da agitação marítima do largo até à zona de espraio e para reproduzir a evolução morfodinâmica, a fim de avaliar a ocorrência de galgamento e erosão resultantes de eventos meteo-oceanográficos extremos. O local de estudo incide sobre o sector urbano artificializado da Costa da Caparica, que é composto por um campo de esporões e uma estrutura de proteção aderente em toda a extensão, formando seis células de praia arenosa. As simulações cobriram 96 h de forçamentos oceanográficos, representando, assim, a passagem da tempestade Hércules/Christine, entre os dias 3 e 7 de janeiro de 2014. O modelo SWAN propagou com sucesso as condições de agitação marítima para a área de estudo, quando comparado com os dados registados pela boia do Porto de Lisboa. Em relação ao modelo XBeach, este foi capaz de reproduzir alguma da evolução morfodinâmica espectável, contudo a erosão da praia emersa ficou aquém dos relatos documentados, não tendo sido possível avaliar quantitativamente os resultados. O alcance máximo do espraio obtido ao longo deste troço de costa foi inferior ao documentado, o que induz a falhas na previsão de inundações devido ao galgamento. Estes resultados podem ser devidos a uma parametrização inadequada do modelo e/ou à falta de levantamentos topo-batimétricos da praia. Esta abordagem metodológica representa um passo importante para uma melhor estimativa da evolução morfodinâmica na Costa da Caparica devido a eventos de tempestade e significa um importante esforço inicial para melhorar a avaliação dos eventos de galgamento e inundação.

Palavras-Chave: Riscos costeiros; Galgamento; Inundação; Erosão; Espraio; Tempestade marítima

ABSTRACT: The use of numerical modelling to simulate coastal hazards is increasing in popularity. In this study, a multimodel framework, SWAN + XBeach (*surf beat* mode), is used to propagate waves from offshore to the shoreline and reproduce morphodynamic changes in extreme events, to assess overtopping and erosion hazards in Costa da Caparica. The study site is an artificialized coastal sector with rocky groynes forming six sandy beach cells and a seawall at the backside. The simulations covered 96 hours representing the impact of Hércules/Christine storm between January 3 and 7, 2014, in the study area. SWAN model successfully propagated the wave conditions from offshore to the study area when compared against the nearby Port of Lisbon buoy data. Regarding the XBeach model, it was able to reproduce some of the expected morphological evolution, however the beach erosion did not fully correspond to the reported descriptions. The model clearly underestimated the run-up, which induces to deficiency of flood forecasting due to overtopping. These results can be the consequence of an inappropriate model parameterization and/or the lack of available beach topobathymetric historic data. This framework represents an important step to achieve a better estimation of the morphodynamic evolution in Costa da Caparica due to storm events and signifies an initial effort to improve the assessment of the overtopping and flood events.

Keywords: Coastal Risks; Overtopping; Flood; Erosion; Run-up; Storms

1. INTRODUÇÃO

Este estudo foi desenvolvido no âmbito do projeto EW-Coast – *Early warning system for coastal risks induced by storms*. O projeto pretende desenvolver, testar e validar um sistema de previsão e alerta para eventos de risco de galgamento, inundação e erosão em zonas costeiras, com base numa rede bayesiana (Poelhekke et al., 2016). O sistema será aplicado a 3 casos de estudo (Praias da Quarteira, de Faro e da Costa da Caparica) e avaliará os potenciais impactos para cada local de estudo (EW-Coast, 2019).

Comumente, as análises e a previsão de risco no domínio costeiro baseiam-se em formulações empíricas, tanto para o galgamento e inundação como para a análise da erosão, podendo inclusive recorrer-se a indicadores (geoindicadores), como é o caso da análise de evolução de praias de areia (Carapuço et al., 2016). Estes métodos têm a grande vantagem de se obterem resultados num curto espaço de tempo com baixo investimento. No entanto, os resultados são pouco precisos, em grande parte, devido à limitada aplicabilidade de cada formulação empírica. Com efeito, as fórmulas empíricas não contemplam a imensa diversidade de zonas costeiras e de condições de forçamento dos sistemas, pelo que os modelos numéricos constituem uma alternativa viável, pois possuem maior capacidade de resolução para a conjugação da diversidade de *inputs*, e englobam um maior número de processos físicos. O problema da utilização destes modelos numéricos prende-se com o tempo de computação, barreira esta que tem vindo a diminuir em consequência da evolução da tecnologia, tendo permitido ampliar a sua utilização, e consequente validação, aumentando a robustez destas ferramentas. Apesar destes avanços, em grandes áreas costeiras, é comum recorrer-se ao acoplamento de modelos numéricos para a simulação dos efeitos da agitação marítima, em termos de galgamento, inundação e erosão costeira.

Neste projeto e no presente estudo, utiliza-se a acoplação de dois modelos numéricos: SWAN (Booij et al., 1999) e XBeach (Roelvink et al., 2009). O modelo numérico SWAN, é um modelo espectral que efetua a geração e propagação da agitação marítima em grandes áreas costeiras (não inclui processos morfodinâmicos). O modelo numérico XBeach, adequado a pequenas áreas, combina processos hidro e morfodinâmicos e respetivos impactos em praias de areia para a escala de tempo de tempestades (Roelvink et al., 2009). Esta estratégia de modelação foi aplicada ao caso de estudo da Costa da Caparica, considerando como forçamento as características da agitação marítima associadas

à tempestade Hércules/Christine, que atingiu Portugal Continental de 5 a 7 de janeiro de 2014 (Santos e Mendes, 2014). Esta é uma tempestade documentada com impactos conhecidos na área de estudo, o que constitui um bom caso de estudo para avaliação dos modelos SWAN e XBeach nesta situação extrema.

Note-se que, a Costa da Caparica é umas das áreas balneares mais procuradas pelos habitantes de grandes centros urbanos, como Almada e Lisboa, entre outros, devido à proximidade a estes núcleos urbanos e às suas praias apazíveis, com um grande foco de desenvolvimento turístico assente nestas premissas. O troço costeiro em estudo, trata-se de uma zona onde se desenvolvem atividades recreativas e de lazer (e.g. passeios, surf, entre outras) ao longo de todos os meses do ano. No entanto, é uma zona onde a ocorrência de eventos de galgamentos é elevada, tanto na frequência como na magnitude, acompanhados de elevadas movimentações sedimentares, o que leva, nalguns casos, a que se verifiquem zonas com erosão significativa, comprometendo a prática das atividades regulares, podendo mesmo pôr em causa a integridades das estruturas de defesa existentes. A modelação da dinâmica sedimentar desta zona recorrendo a modelos numéricos, como o XBeach, constitui sem dúvida uma oportunidade e um desafio.

2. CASO DE ESTUDO: COSTA DA CAPARICA

A Costa da Caparica situa-se na costa oeste de Portugal continental, imediatamente a sul do estuário exterior do rio Tejo. A área de estudo abrange o setor costeiro artificializado, entre troço sul da praia de São João da Caparica e o troço norte da Nova Praia (Figura 1). Esta área apresenta uma extensão longilitoral aproximada de 2.70 km, com uma orientação predominante NNW-SSE, sendo este um troço litoral baixo e arenoso com estrutura rígida de proteção aderente em toda a extensão da área de estudo, acompanhada de um campo de esporões. Esta é uma área urbana, onde sobre a estrutura de proteção aderente estão implantados diversos apoios de praia (bares, restaurantes e escolas de surf), acessível todo o ano.

A Costa da Caparica é uma zona sensível à ocorrência de galgamento e erosão devido a eventos oceanográficos extremos, dos quais decorrem gastos avultados a fim de manter as condições balneares e proteger a linha de costa.

No âmbito do projeto EW-Coast foi elaborado um levantamento da ocorrência de erosão e/ou galgamento na zona de estudo, entre 2000 e 2019, devido a tempestades marítimas. Esta compilação de eventos teve por base relatos de jornais, relatórios



Figura 3. Exemplos de tempestades marítimas com ocorrência de galgamento na frente costeira da Costa da Caparica. À esquerda: recorte do Diário de Notícias em janeiro de 2007. À direita: fotografia publicada pelo jornal Público em janeiro de 2014.

O desempenho da modelação SWAN foi verificado através da comparação com os dados da boia ondógrafo da Administração do Porto de Lisboa localizada na região costeira em estudo, Figura 4. Para a modelação XBeach, os resultados foram confrontados com relatos históricos.

2.1.1 Modelação SWAN

A propagação da agitação marítima, desde águas profundas até águas pouco profundas, foi modelada recorrendo ao modelo numérico de propagação espectral SWAN.

Para a aplicação deste modelo recorreu-se a dois modelos batimétricos, o modelo batimétrico do rio Lis ao cabo Espichel, com resolução de 250 m (IH, 2013), e um modelo batimétrico de alta resolução do rio Tejo (EMODnet, 2019), Figura 4, para a construção das malhas batimétricas. Foram consideradas duas grelhas computacionais, uma de carácter regional (*Main Grid*) e uma intermédia (*Nested Grid*), correspondentes a malhas encaixadas, com resolução de 500 m e 100 m, respetivamente. O regime de agitação marítima na costa oeste de Portugal continental caracteriza-se por uma predominância de noroeste (Costa et al., 2001). Contudo, no que concerne a regimes de tempestades, segundo Rogers (1997), nesta região do Atlântico ocorrem tempestades extratropicais, oriundas de noroeste em consonância com o regime predominante da agitação marítima na região, mas também se manifestam tempestades subtropicais, de sudoeste, às quais a zona de estudo se encontra mais exposta. Atendendo, por um lado às características dos regimes de tempestade e, por outro, à exposição do troço costeiro em estudo, foram consideradas duas séries de dados de agitação

ao largo: Input_1 e Input_2 (Figura 4), a primeira imposta na fronteira norte e a segunda imposta nas fronteiras oeste e sul, do domínio computacional regional. As séries de dados de agitação marítima, nos pontos Input_1 e Input_2, foram obtidas a partir do modelo global WAM (ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts).

Os resultados da modelação da agitação marítima até perto da costa foram avaliados através da análise dos registos da boia ondógrafo da Administração do Porto de Lisboa, doravante designada por Boia APL, cujas coordenadas são -109279 m e -114963 m (ETRS89 Portugal TM06) e que se encontra sobre a batimétrica dos 22 m.

2.1.2 Modelação XBeach

Recorreu-se ao modelo XBeach para resolver a propagação da agitação marítima até ao limite do espraio, em simultâneo com a modelação dos processos morfodinâmicos decorrentes dos forçamentos oceanográficos, tal como o transporte sedimentar, a formação de escarpas ou a variação dos fundos e a sua atualização ao longo da simulação (*bed update*). Nos processos hidrodinâmicos, o modelo é capaz de resolver equações horizontais 2D acopladas para a propagação da agitação, correntes, transporte sedimentar e variação do fundo, com forçamentos variáveis no tempo, tanto para ondas (com possibilidade de forçamento espectral), como para correntes e marés (Roelvink et al., 2009). Dos processos hidrodinâmicos envolvidos, destaca-se a transformação de ondas longas (infra-gravíticas) através da sua geração, propagação e dissipação. O modelo disponibiliza um módulo, que permite incorporar a resolução das ondas curtas com menor esforço computacional, modo *surf beat*, resolvendo

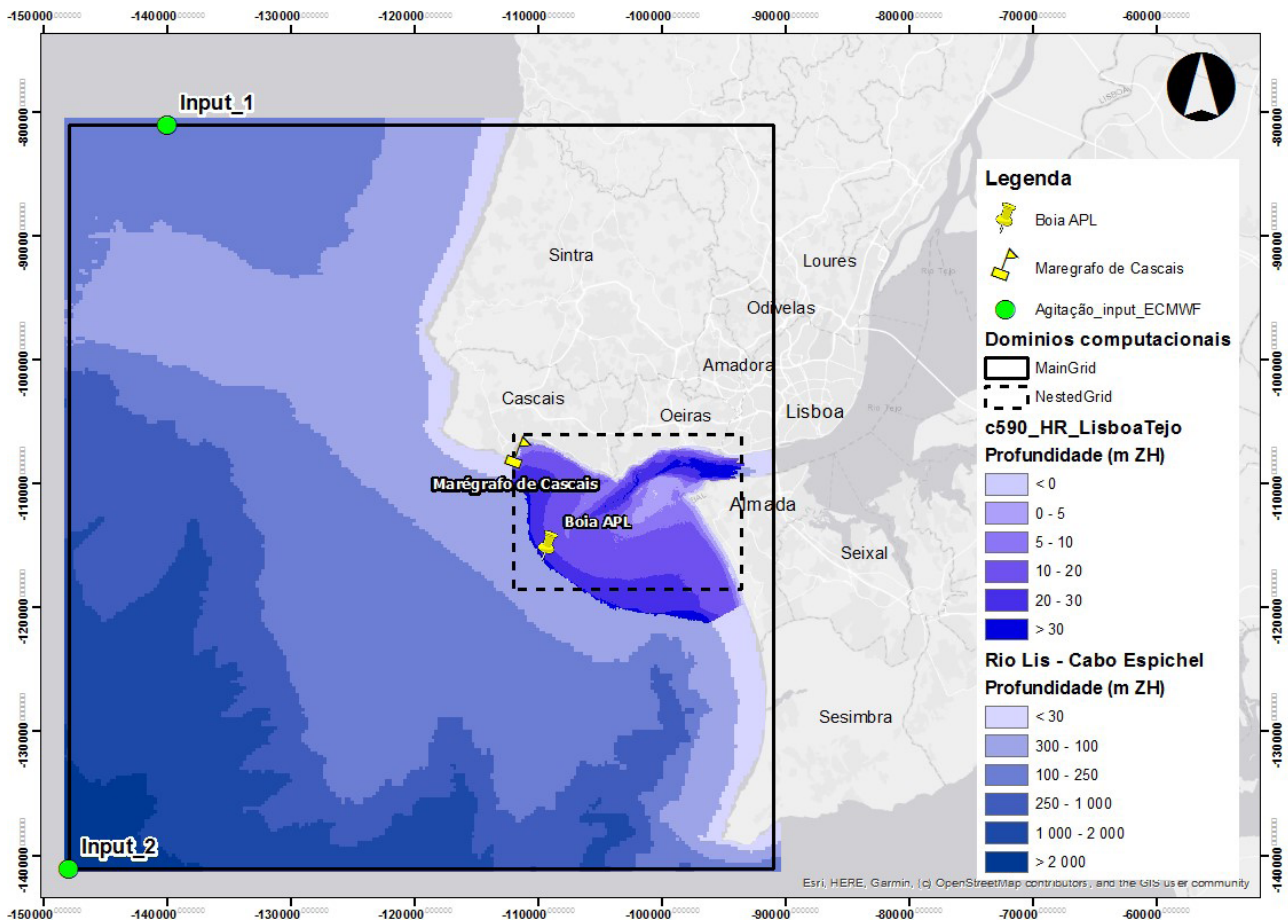


Figura 4. Representação das malhas batimétricas e domínios computacionais utilizados na modelação SWAN. Localização dos pontos onde foram obtidos os dados de agitação ECMWF a impor ao modelo (Input_1 e Input_2), localização da boia ondógrafo da Administração do Porto de Lisboa (APL) e localização do marégrafo de Cascais.

as ondas curtas à escala do grupo de ondas pela sua envolvente superior, recorrendo às equações HISWA (Holthuijsen *et al.*, 1989). Já as ondas infra-gravíticas são resolvidas pela aplicação das equações não-lineares da teoria de onda em condições de água pouco profundas, NLSW (*nonlinear shallow water*). O modo *surf beat* é particularmente útil quando se pretendem modelar processos na zona de espraio (*swash zone*), como é o caso dos processos erosivos em litorais baixos e arenosos, quando os movimentos na zona de espraio (*run-up* e *run-down*) são dominados pela banda infragravítica (e.g. em praia dissipativas (Holman, 1981, 1983; Holman e Sallenger, 1985), ou praias intermédias durante eventos extremos (Wright *et al.*, 1986).

Para o modelo XBeach (em modo *surf beat*), recorreu-se ao acoplamento de um conjunto de dados topo-batimétricos disponíveis, a saber, o modelo batimétrico de alta resolução do rio Tejo (EMODnet, 2019), o modelo LIDAR 2011 para zonas costeiras (DGTerritório, 2011) e levantamentos topográficos entre as praias de Santo António e Traquínio-Paraíso (praia emersa, estruturas de proteção aderentes e seu tardoz) em maio e outubro de 2019, realizados com recurso a *drone* no âmbito do projeto EW-Coast,

pela equipa da UAlg. Os forçamentos oceanográficos impostos ao modelo foram obtidos através da modelação SWAN, anteriormente descrita.

A zona de estudo encontra-se a sul do estuário exterior do Tejo, onde a batimetria apresenta uma configuração não paralela na aproximação à costa e de baixas profundidades, o que constitui uma dificuldade para a aplicação do modelo XBeach. Assim, para a modelação, a fim de minimizar os constrangimentos impostos pelas condições locais da zona de estudo, foi alargado o domínio computacional, Figura 5 (à esquerda), através da extensão das laterais, para que os problemas que surgem junto às fronteiras laterais não interferissem na área de interesse. Além disso, foi criada uma zona de profundidade constante para a geração das condições de agitação a impor no domínio de cálculo, com profundidade de 25 m, de modo a criar condições de fronteira favoráveis às ondas infragravíticas (McCall, 2017).

A malha e a topo-batimetria correspondente foram geradas recorrendo ao Delft3D, através dos módulos de geração de grelhas Delft3DRGFGRID (Deltares, 2013) e de interpolação da batimetria Delft3DQUIKIN (Deltares, 2020).

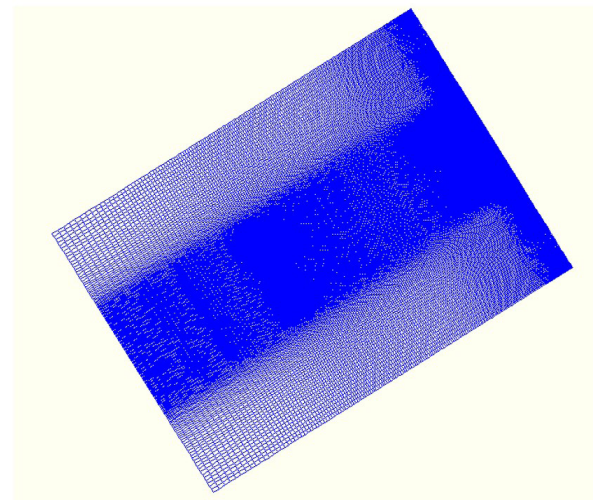
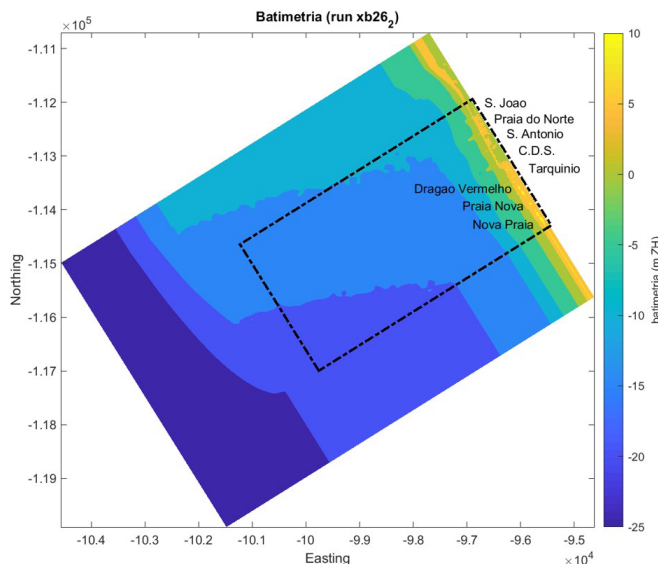


Figura 5. À esquerda, batimetria utilizada na modelação XBeach, com indicação da área de interesse, a traço-ponto. À direita, malha estruturada não-regular de 5800 x 8000 m.

Optou-se por uma malha estruturada não-regular, Figura 5 (à direita), com 8000 m, na dimensão transversal à costa, com aumento de resolução na aproximação à praia, resolução máxima de 2 m, compreendendo um total de 345 células. Segundo a dimensão longitudinal, o comprimento total é de 5800 m, com maior resolução na zona entre esporões, resolução máxima de 5 m, com 496 células. Foi imposta uma rotação na malha para que a dimensão transversal se aproximasse da perpendicularidade à linha de costa, na generalidade da área de estudo.

As estruturas rígidas foram consideradas através da definição de zonas não erodíveis, Figura 6, com a aplicação de uma malha de pontos erodíveis e não erodíveis, com as mesmas características e dimensões da malha batimétrica.

Neste estudo, a modelação XBeach é forçada pelos resultados de agitação marítima obtidos pelo SWAN, tendo sido feita uma simulação da tempestade Hércules/Christine, que atingiu a zona de estudo em janeiro de 2014 (Santos e Mendes, 2014). Durante esta tempestade ocorreram várias situações de galgamento na zona de estudo, que foram documentadas por vídeos e jornais, o que se traduz em informação relevante para avaliação dos resultados obtidos com o XBeach.

Os dados sedimentares utilizados resultam da recolha, e posterior tratamento laboratorial, de amostras da zona da praia emersa, por parte da equipa da UAlg, no âmbito do projeto EW-Coast. O material sedimentar foi recolhido em maio de 2019. A parametrização utilizada nesta simulação, Tabela 1, resultou de várias corridas-teste, assim como de testes de sensibilidade.

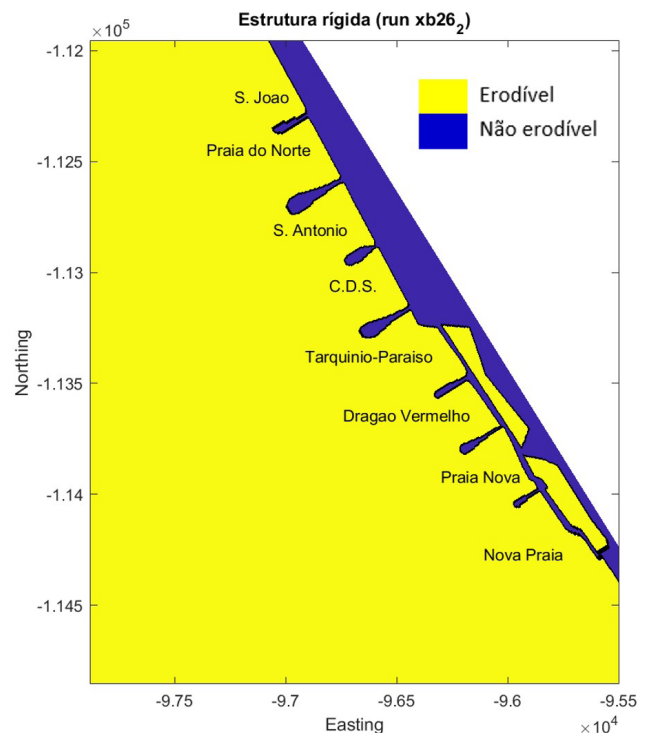


Figura 6. Representação da estrutura rígida definida através da definição de zonas erodíveis e não erodíveis.

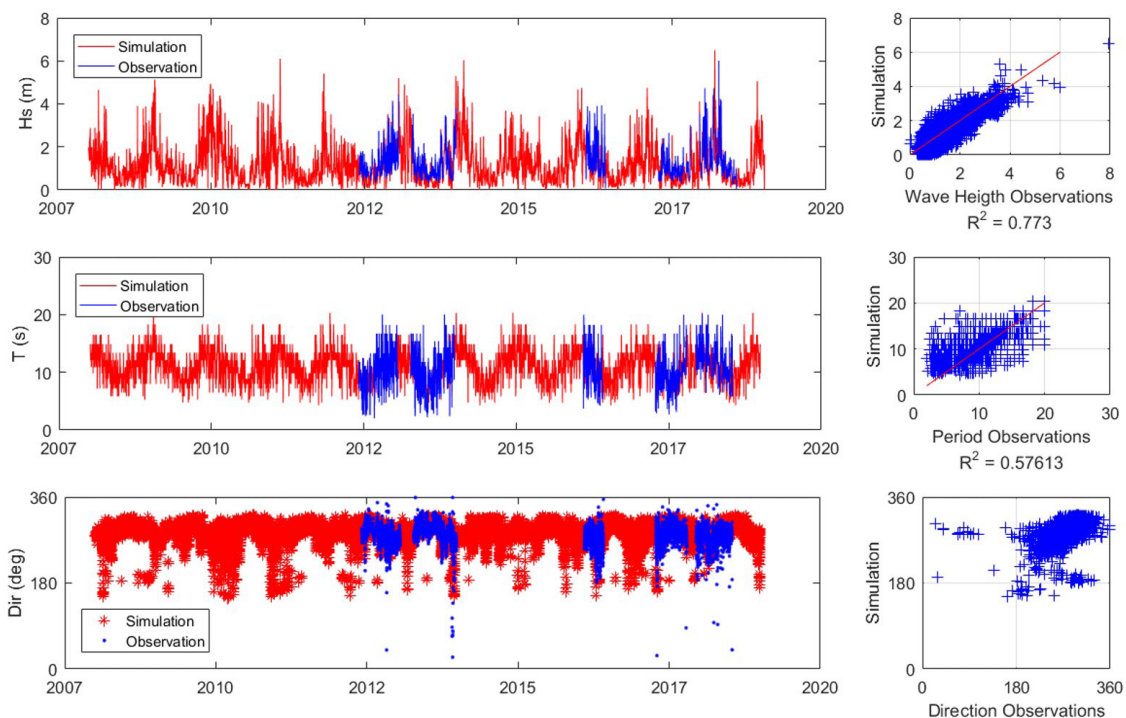
2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 SWAN

Os resultados da propagação da agitação marítima foram validados por comparação com os dados registados na boia ondógrafo da APL. Para a validação, foi feita a simulação da propagação da agitação entre 2008 e 2018.

Tabela 1. Parametrização utilizada na modelação XBeach. (A descrição de cada parâmetro pode ser encontrada em: https://xbeach.readthedocs.io/en/latest/user_manual.html).

Processos físicos	Parâmetros das condições de fronteira laterais	Parâmetros das condições de rebentação	Parâmetros de escoamento	Parâmetros de transporte sedimentar	Parâmetros morfológicos
wavemodel =surfbeat swave =1 single_dir =1 lwave =1 flow =1 sedtrans =1 morphology =1 avalanching =1 viscosity =1 advection =1	front =abs_2d left =neumann right =neumann back =abs_2d ARC =1 order =2.0000 epsi =-1.0000 tidetype =velocity	break =roelvink2 gamma =.5410 gamma_max =2.3640 alpha =1.2620 n =10.0000 delta =.1000	bedfriction =manning bedfriccoef =.0200 nuh =.1000 nuhf =1.0000 nuhv =1.0000 smag =1 hmin =.5000	facua =.1500 bermslope =.1000	morfac =10.0000 hswitch =.0100 struct =1

**Figura 7.** Comparação entre os resultados paramétricos da agitação marítima, H_s , T_p e Dir, no ponto da Boia APL e os registos efetuados pela Boia APL.

Dos resultados obtidos, Figura 7 e Tabela 2, verifica-se uma boa relação da altura de onda significativa, com um R^2 superior a 0.7, em relação ao período de pico, ainda que menor, a relação continua acima dos 50%. Em geral, face à escala de cada parâmetro, os erros associados foram considerados aceitáveis. Foi feita a caracterização do regime de agitação marítima junto à área de interesse, tendo sido considerado o ponto da Boia APL como representativo. Os parâmetros característicos da agitação marítima apresentam uma variação marcadamente sazonal, Figura 8, entre o verão e inverno marítimos, abril a setembro e outubro a março, respetivamente. Atendendo a esta variação, procedeu-se a uma análise sazonal dos vários parâmetros, assim como às relações entre os parâmetros.

Da análise sazonal no ponto da Boia da APL, Figura 9 (à esquerda), verifica-se a ocorrência de agitação com períodos mais longos no inverno marítimo podendo ultrapassar os 20 s, enquanto no verão raras são as vezes que ultrapassa os 18 s. Note-se, no entanto, que as maiores alturas de onda significativas registem períodos na ordem dos 15 s. Considerando alturas acima dos 4 m, com ocorrência predominante no inverno, os períodos de pico variam entre os 9 s e os 20 s.

Sazonalmente, a agitação no local em análise sofre uma ligeira rotação para sul no inverno marítimo, Figura 9 (à direita) e Figura 10, ainda que mantenha a predominância de WNW, com mais ocorrências vindas de oeste, principalmente relevante na agitação com maiores alturas. Acima dos 4 m, verifica-se uma direção preferencial de oeste, com

Tabela 2. Resultados estatísticos e erros associados à modelação da propagação da agitação segundo metodologia adotada no ponto da Boia da APL.

	Dimensão da amostra, N	Viés	RMS	Scatter Index, SI	R ²
H _s (m)	31801	-0.185	0.421	0.336	0.773
T _p (s)	31801	0.225	2.017	0.190	0.576
Dir (° N)	31801	7.4	20.0	---	---

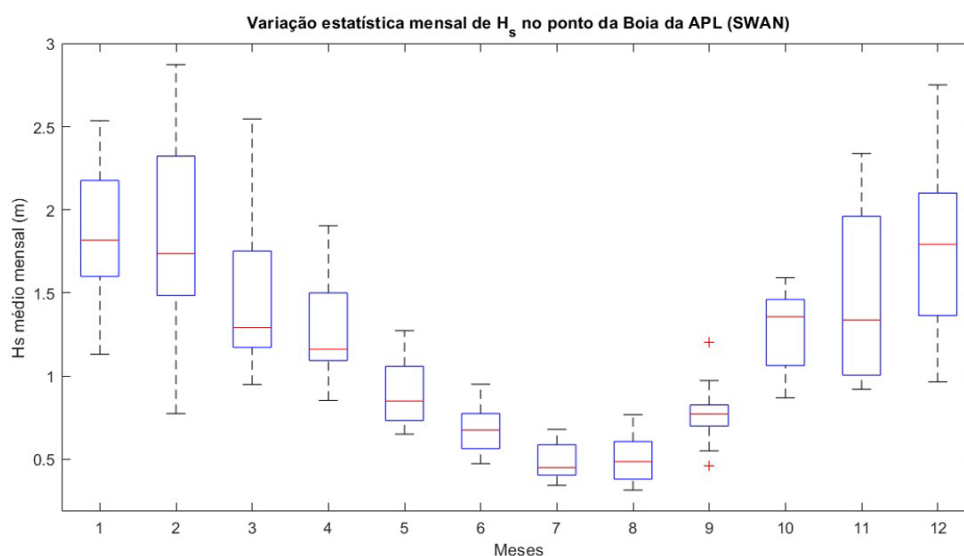


Figura 8. Variação estatística mensal de H_s, entre 2008 e 2018 (Diagrama de extremos e quartis, com a representação da mediana e valores atípicos) no ponto da Boia da APL.

algumas manifestações de WSW características das tempestades subtropicais, referidas em 2.1.1.

2.2.2 XBeach

Foi feita uma simulação de 96 h, recorrendo ao modelo XBeach, correspondendo à tempestade Hércules/Christine, entre os dias 3 e 7 de janeiro de 2014. A agitação marítima imposta ao sistema resulta da aplicação do modelo SWAN, atrás descrita, tendo-se obtido uma altura de onda significativa máxima de 5 m, e o nível do mar considerado foi o registado pelo marégrafo de Cascais (Tabela 3 e Figura 11). Nesta modelação, foi considerada uma direção de onda constante, perpendicular ao alinhamento do troço em estudo (238°N).

A análise dos resultados foi feita através da análise espacial (2D) dos resultados e através da análise 1D de oito perfis transversais ao longo do troço costeiro em estudo (um por praia, Figura 1), para os quais foram analisadas as cotas altimétricas máximas alcançadas pelo espraio e a variação morfológica, ao longo das 96 h simuladas.

No presente estudo, considera-se que ocorre inundação associada a galgamento costeiro quando o espraio das ondas ultrapassa o coroamento da estrutura de defesa aderente. Pelos resultados

hidrodinâmicos desta simulação, o único local onde ocorreu inundação associada a galgamento foi na praia do Norte, como se pode ver na Figura 12. No entanto, dos registos documentados, durante esta tempestade ocorreram inundações e galgamentos ao longo de toda a estrutura de defesa aderente (e.g. na praia de Santo António, Figura 3). Face às evidências históricas, considera-se que, a partir desta modelação, os valores máximos de alcance do espraio foram subestimados. É importante notar que a batimetria utilizada, por falta de dados, pode não corresponder à situação verificada na altura da tempestade Hércules.

Em relação à variação morfodinâmica, foi analisada toda a área de estudo e foram particularizados oito perfis, um por praia. Os resultados mostram uma elevada movimentação sedimentar. Ao final das 96 h de simulação o panorama geral da zona de estudo é o apresentado na Figura 13. Ao analisar esta figura, verifica-se que em todas as praias existem zonas de acreção e erosão, sendo as zonas de acreção mais significativas na praia submersa, com a criação de barras submarinas, resultante de transporte sedimentar transversal (*cross shore*) das áreas de menor profundidade, onde se vêm valores negativos, representativos de erosão.

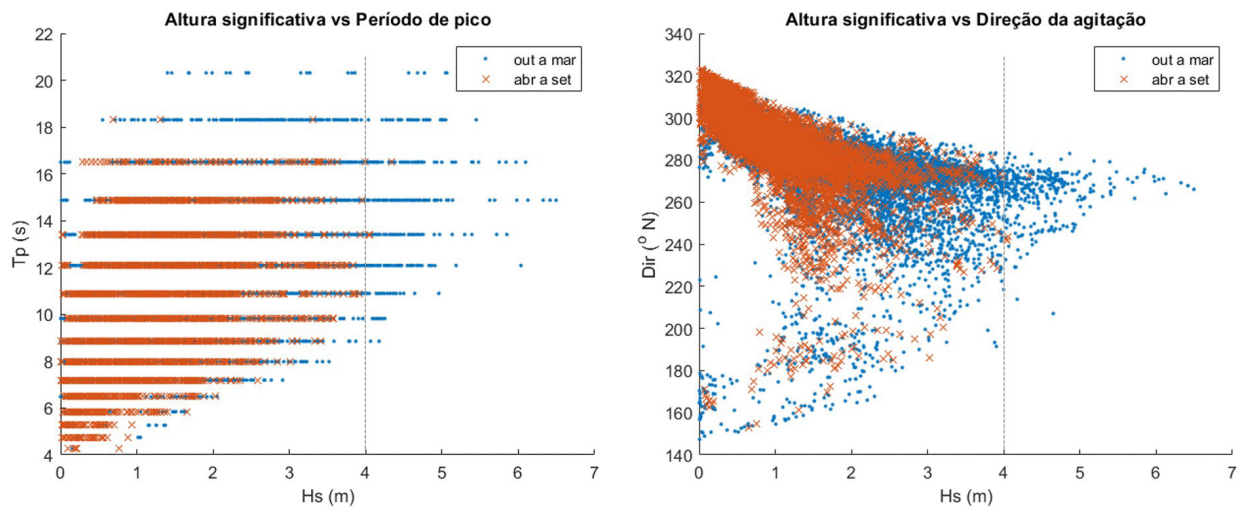


Figura 9. Análise sazonal dos parâmetros característicos da agitação marítima no ponto da Boia da APL. À esquerda: Distribuição da altura de onda significativa em função do período de pico. À direita: Distribuição da altura de onda significativa em função da direção da agitação.

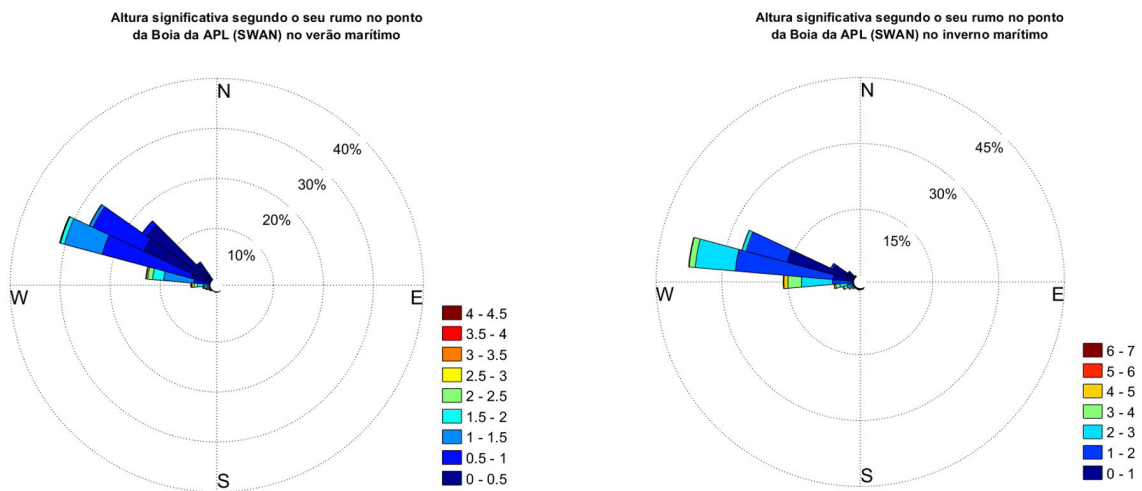


Figura 10. Distribuição sazonal da altura de onda significativa segundo o seu rumo, no ponto da Boia APL. À esquerda, referente ao verão marítimo, entre abril e setembro. À direita, referente ao inverno marítimo, de outubro a março.

Tabela 3. Caracterização dos forçamentos entre os dias 3 e 7 de janeiro de 2014, no ponto da boia da APL.

Hs (m)		Tp (s)		Dir (°N)		Nível do Mar (m ZH)	
Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2.75	5.06	13.4	20.3	263	277	0.63	3.98

As praias em análise são praias estreitas por confinamento da estrutura rígida aderente, estando a praia emersa praticamente limitada à zona entre marés, podendo inclusive não ter espaço para a formação da berma de praia (nomenclatura adotada de RGCI, 2007). À exceção do perfil 3, os restantes apresentavam um perfil inicial com sistema de lomba-canal, mais ou menos acentuados, que desaparece no decorrer da simulação, dando lugar à formação de uma barra submarina, visível nos perfis 1, 2, 7 e 8. Nalguns perfis, vê-se que durante

a simulação houve a formação de uma pequena escarpa de erosão temporária na zona ativa da praia, ocorrendo algumas destas escarpas na base da estrutura de proteção aderente (perfis 1, 2 e 3). Nos perfis 7 e 8, há um rebaixamento final dos perfis na zona emersa da praia junto da estrutura aderente.

Devido à ausência de perfis pré e pós-tempestade das praias analisadas, não é possível fazer uma avaliação quantitativa dos resultados. Existem levantamentos realizados no âmbito de parcerias

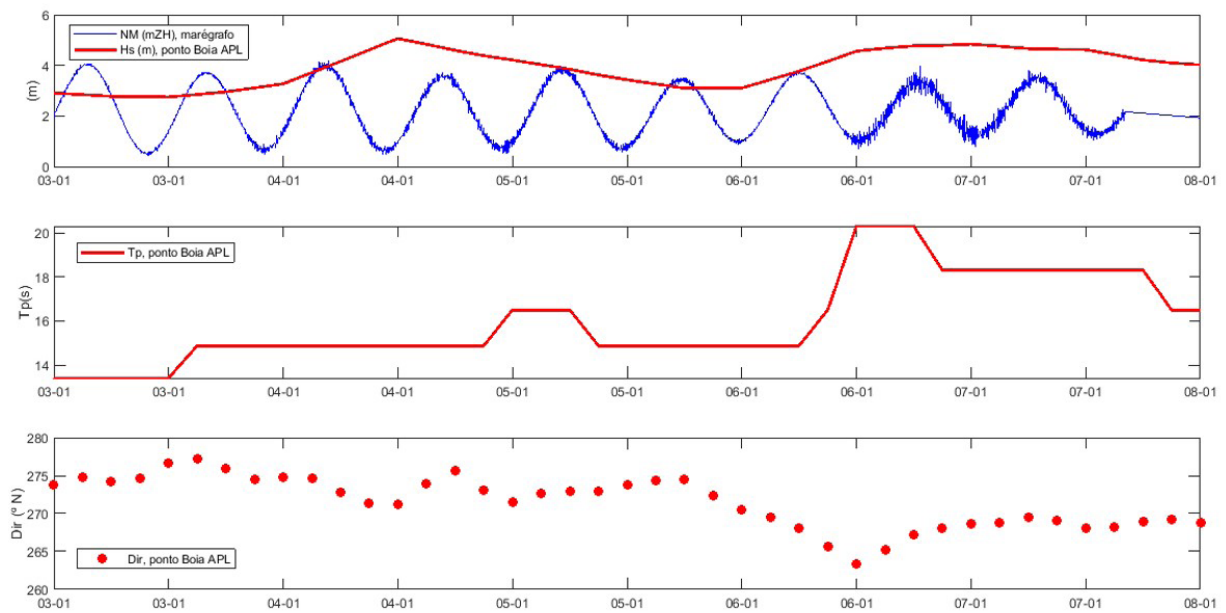


Figura 11. Variação das condições oceanográficas entre os dias 3 e 7 de janeiro de 2014. De cima para baixo, nível do mar registado no marégrafo de Cascais e altura de onda significativa no ponto da Boia APL (resultado SWAN); período de pico no ponto da Boia APL (resultado SWAN); e direção da agitação marítima no ponto da Boia APL (resultado SWAN).

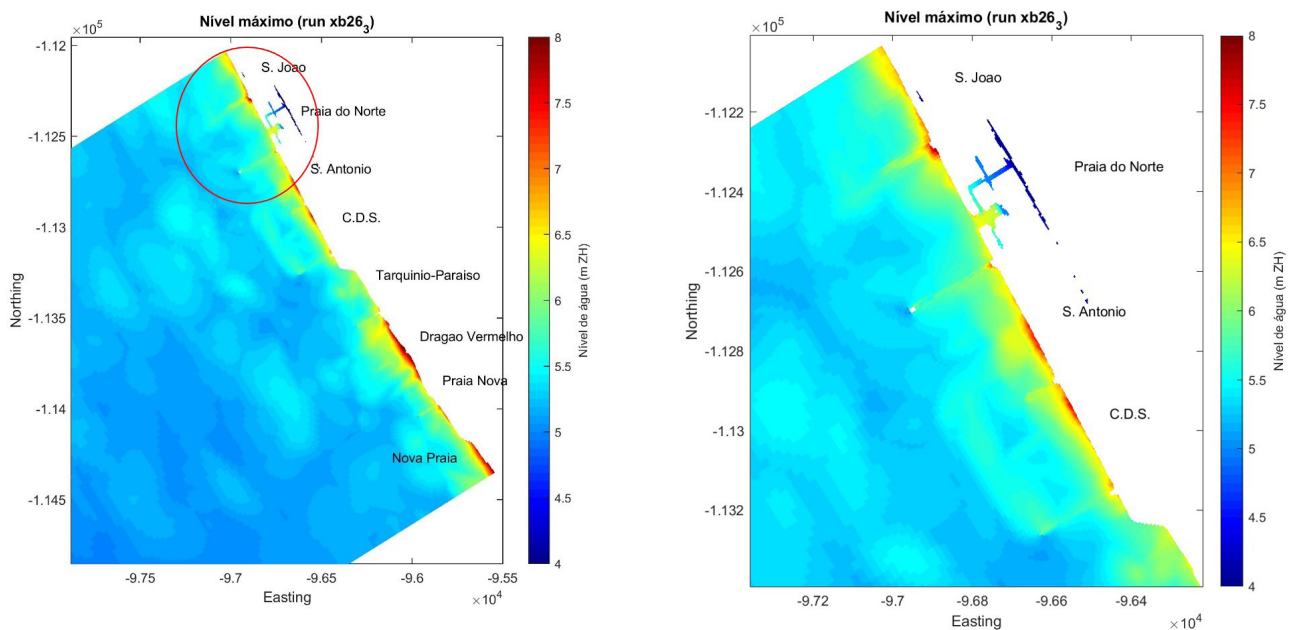


Figura 12. Nível máximo atingido pela superfície livre na simulação de 96 h recorrendo ao modelo XBeach 2D, com a identificação das praias. À esquerda, o nível máximo atingido na zona de estudo. À direita, um detalhe da Praia do Norte com inundação.

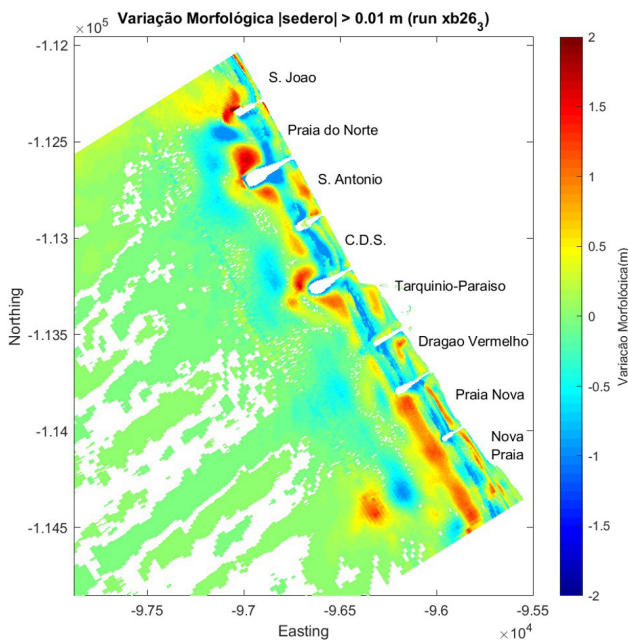


Figura 13. Representação da variação morfológica, superior a 0.01 m, no final das 96 h de simulação. Valores positivos significam acreção e valores negativos indicam erosão.

entre a Câmara Municipal de Almada e o Instituto Dom Luiz – Centro de Geologia da FCUL, contudo, em 2014 registaram-se vários eventos, entre os quais dois grandes temporais, o de janeiro e outro em fevereiro, e os levantamentos foram realizados em abril desse ano, pelo que não é possível fazer a comparação desta tempestade específica.

Segundo um relatório realizado pela Agência Portuguesa do Ambiente (Pinto *et al.*, 2014), no que se refere à variação morfológica, houve um rebaixamento generalizados das praias em análise, o mesmo não se verifica com esta simulação.

3. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados apontam para uma subestima do espraio relacionadas com a parametrização imposta ao modelo XBeach ou com as características da batimetria considerada.

Segundo os estudos de calibração realizados por Vousdoukas *et al.* (2012), as praias mais refletivas aparentam ser mais sensíveis à variação

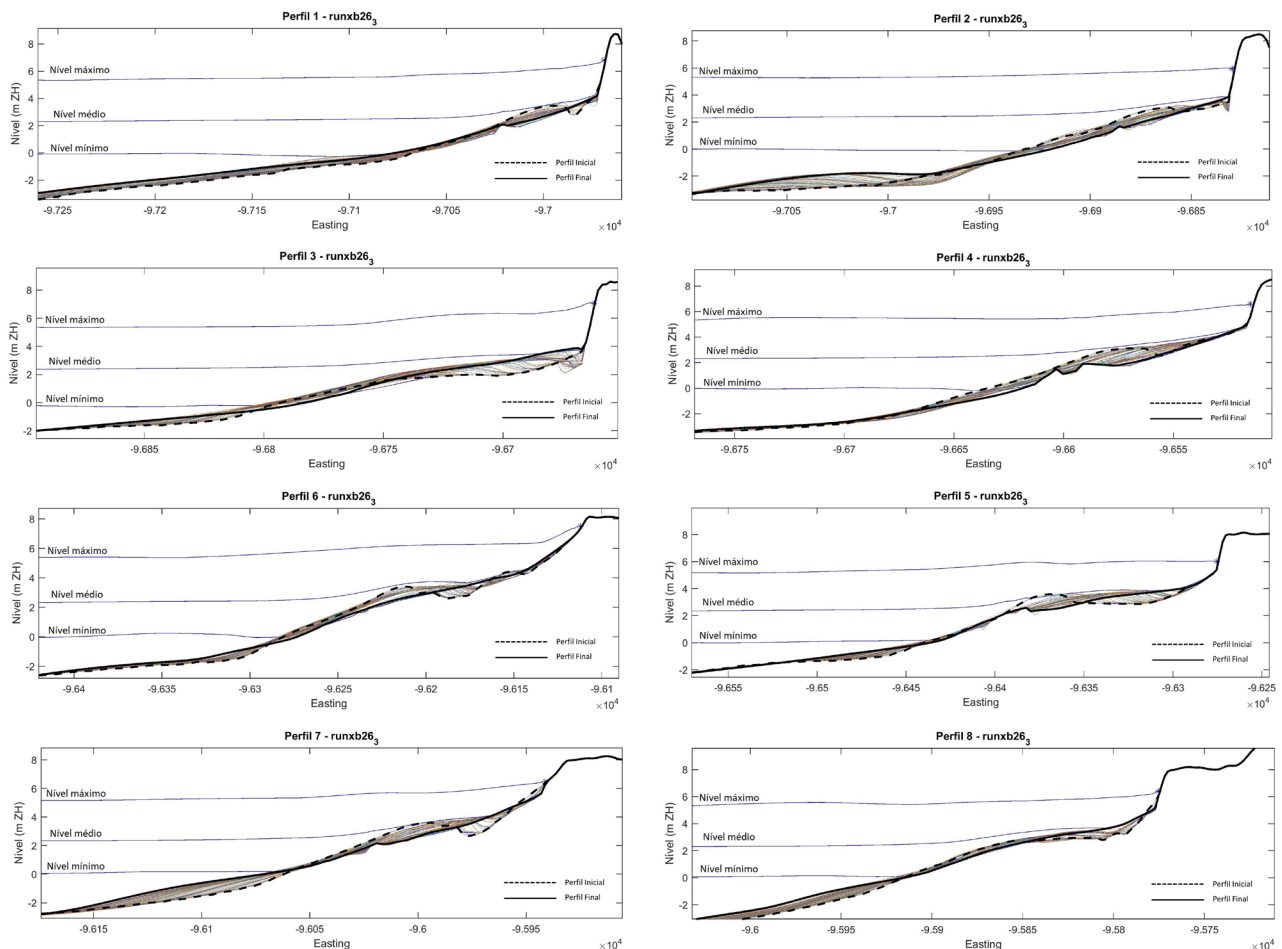


Figura 14. Variação dos perfis de praia durante a simulação das 96 h, pelo XBeach, com a representação dos níveis hidrodinâmicos máximos, médios e mínimos, atingidos pela superfície livre neste período de tempo. Os perfis estão numerados de 1 a 8 e encontram-se dispostos da esquerda para a direita, de cima para baixo.

dos parâmetros de calibração do XBeach. Por outro lado, e por falta de informação, não se dispõe da batimetria da zona de estudo antes da ocorrência da tempestade Hercules/Christine em 2014, principalmente na zona da praia, pelo que os presentes cálculos são efetuados para uma batimetria baseada em levantamentos recentes o que condiciona os resultados obtidos e pode levar a diferenças significativas. Finalmente, este troço costeiro apresenta uma batimetria, em águas intermédias, pouco regular no interior do domínio considerado, e dessa forma, o modelo pode não conseguir responder corretamente aos forçamentos impostos.

Os passos seguintes serão a calibração da parametrização do modelo, a análise da batimetria e a reprodução do modelo em modo 1D, através de um conjunto de perfis ao longo da área de estudo, a fim de validar a modelação para o espraio e a erosão. Após estas será necessário avaliar eventos dos galgamentos e compará-los com as formulações empíricas, e/ou outras metodologias existentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao projeto com referência ALG-LISBOA-01-145-FEDER-028657 atribuída pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, IP, suportado pelos orçamentos do Programa Operacional Regional do Algarve e do Programa Operacional Regional de Lisboa na sua componente FEDER e pelo orçamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia na sua componente OE.

Agradecem ainda ao projeto Mosaic.pt - Análise do risco de inundação costeira a partir de múltiplas fontes para comunidades seguras e desenvolvimento sustentável, referência PTDC/CTA-AMB/28909/2017 e ao projeto To-Sealert - Wave overtopping and flooding in coastal and port areas: Tools for an early warning, emergency planning and risk management system, Ref. PTDC/EAM-OCE/31207/2017, atribuída pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, IP.

Ao grupo RG2 – *Earth Surface Processes* do Instituto Dom Luiz.

Também agradecem à Administração do Porto de Lisboa, S.A., pela cedência dos dados de agitação marítima registados pela sua boia ondógrafo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Booij, N., Ris, R. C., e Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>

Carapuço, M. M., Taborda, R., Silveira, T. M., Psuty, N. P., Andrade, C., e Freitas, M. C. (2016). Coastal geoindicators: Towards the establishment of a common framework for sandy coastal environments. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 154, pp. 183–190). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.002>

Costa, M., Silva, R., e Vitorino, J. (2001). Contribuição para o Estudo do Clima de Agitação Marítima na Costa Portuguesa. *2as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária - Associação Internacional de Navegação*, 20.

Deltares. (2013). *Delft3D 3D/2D modelling suite for integral water solutions User Manual RGFRID*. https://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/rgfrid_user_manual.pdf

Deltares. (2020). *Delft3D 3D/2D modelling suite for integral water solutions User Manual QUICKIN*. https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/QUICKIN_User_Manual.pdf

Ferreira, J. C. R. (2016). *Ordenamento Ambiental de Frentes Urbanas Litorais em Áreas Baixas de Elevado Risco e Vulnerabilidade ao Galgamento Costeiro. As Infraestruturas Verdes como Estratégia de Resiliência para as Comunidades Costeiras* [FCT-UNL]. <http://hdl.handle.net/10362/19883>

Heleno, A. J. P. (2017). *Avaliação do espraio e inundação nas praias da Costa da Caparica: modelação com o modelo XBEACH* [Instituto Superior de Engenharia de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10400.21/7108>

Holman, R. A. (1981). Infragravity energy in the surf zone. *Journal of Geophysical Research*, 86(C7), 6442. <https://doi.org/10.1029/JC086iC07p06442>

Holman, R. A. (1983). Edge waves and the configuration of the shoreline. In Paul D. Komar (Ed.), *CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion* (pp. 21–34). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351072908-2>

Holman, R. A., e Sallenger, A. H. (1985). Setup and swash on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 90(C1), 945–953. <https://doi.org/10.1029/JC090iC01p00945>

Holthuijsen, L. H., Booij, N., e Herbers, T. H. C. (1989). A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal Engineering*, 13(1), 23–54. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(89\)90031-8](https://doi.org/10.1016/0378-3839(89)90031-8)

Jaranović, B. (2017). *Perigosidade associada a temporais no arco litoral Cascais – Cabo Espichel* [Universidade de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10451/30306>

Pinto, C., Rodrigues, A., Costa, C., e Lima, J. (2014). *Registo das ocorrências no litoral Temporal de 3 a 7 de janeiro de 2014*. http://www.apambiente.pt/_zdata/DESTAQUES/2014/RelatorioNacional_Ocorr_Jan_2014_V5.pdf

Poelhekke, L., Jäger, W. S., van Dongeren, A., Plomaritis, T. A., McCall, R., e Ferreira, Ó. (2016). Predicting coastal hazards for sandy coasts with a Bayesian Network. *Coastal Engineering*, 118, 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.08.011>

Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., e Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11–12), 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>

Rogers, J. C. (1997). North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic oscillation and climate variability of Northern Europe. *Journal of Climate*, 10(7), 1635–1647. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1635:NASTVA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1635:NASTVA>2.0.CO;2)

Santos, Â., Mendes, S., e Corte-Real, J. (2014). *Impacts of the storm Hercules in Portugal*. 98, 197–220. <http://www.scielo.mec.pt/pdf/fin/n98/n98a13.pdf>

Vousdoukas, M. I., Ferreira, Ó., Almeida, L. P., e Pacheco, A. (2012). Toward reliable storm-hazard forecasts: XBeach calibration and its potential application in an operational early-warning system. *Ocean Dynamics*, 62(7), 1001–1015. <https://doi.org/10.1007/s10236-012-0544-6>

Wright, L. D., Nielsen, P., Shi, N. C., e List, J. H. (1986). Morphodynamics of a bar-trough surf zone. *Marine Geology*, 70(3–4), 251–285. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(86\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0025-3227(86)90005-8)

REFERÊNCIAS INTERNET

EMODnet. (2019). EMODnet Bathymetry Viewing and Download service. Disponível em: <<https://portal.emodnet-bathymetry.eu/>> Acesso em 7 de outubro de 2019

EW-Coast. (2019). EW-Coast – Early warning system for coastal risks induced by storms. Disponível em: <<https://www.cima.ualg.pt/EW-COAST/>> Acesso em 9 de dezembro de 2019

IH. (2013). Modelo batimétrico - do Rio Lis ao Cabo Espichel. Disponível em: <http://horus.hidrografico.pt/content/dados/ModeloBatimetrico_RioLis_CaboEspichel.rar> Acesso em 7 de outubro de 2019

McCall, R. (2017). RISC-KIT Hotspot Tool - Self-assessment guidance - Webinar. Disponível em: <<https://Oss.Deltares.NL/Web/Xbeach/Webinars.>> Acesso em 13 de janeiro de 2020

RGCI. (2007). Glossário de Gestão Costeira Integrada. Revista de Gestão Costeira Integrada. Associação Portuguesa Dos Recursos Hídricos (APRH). Disponível em: <<http://www.aprh.pt/rgci/glossario/index.html>> Acesso em 19 de fevereiro de 2020