

# Revista de Gestão Costeira Integrada

## Journal of Integrated Coastal Zone Management

## Modelação da hidrodinâmica e da morfodinâmica na costa Noroeste de Portugal em cenários de alterações climáticas

José Pinho<sup>@1</sup>, Luís Vieira<sup>2</sup>, José Vieira<sup>3</sup>, Gueorgui Smirnov<sup>4</sup>, Ana Gomes<sup>5</sup>, Ana Bio<sup>6</sup>, José Alberto Gonçalves<sup>7</sup>, Luísa Bastos<sup>8</sup>

<sup>@</sup> Corresponding author: [jpinho@civil.uminho.pt](mailto:jpinho@civil.uminho.pt)

<sup>1</sup> Universidade do Minho

<sup>2</sup> Universidade do Minho, [luis.vasquez.vieira@gmail.com](mailto:luis.vasquez.vieira@gmail.com)

<sup>3</sup> Universidade do Minho, [jvieira@civil.uminho.pt](mailto:jvieira@civil.uminho.pt)

<sup>4</sup> Universidade do Minho, [smirnov@math.uminho.pt](mailto:smirnov@math.uminho.pt)

<sup>5</sup> Universidade do Minho, [carolina\\_gomes@live.com](mailto:carolina_gomes@live.com)

<sup>6</sup> CIIMAR – Universidade do Porto, [anabio@ciimar.up.pt](mailto:anabio@ciimar.up.pt)

<sup>7</sup> Fac. Ciências, Universidade do Porto, [jagoncal@fc.up.pt](mailto:jagoncal@fc.up.pt)

<sup>8</sup> Fac. Ciências, Universidade do Porto, [lcbastos@fc.up.pt](mailto:lcbastos@fc.up.pt)

**RESUMO:** No presente artigo, é apresentada a modelação de três trechos costeiros na costa Noroeste portuguesa. Apresentam-se as metodologias de construção, calibração e validação de modelos de propagação da agitação marítima e resultados de níveis extremos para diferentes cenários de alterações climáticas nos três trechos e de morfodinâmica de curto termo numa das praias. É aplicado o software SWAN na implementação de um modelo regional da zona costeira da Península Ibérica, que possibilita a aplicação de uma metodologia de downscaling dinâmico de resultados de modelos globais (atmosféricos e oceânicos), a qual permite a utilização de modelos locais de elevada resolução espacial (Delft3D). A interação dos dois modelos assim acoplados permite simular a propagação da agitação marítima até localizações próximas da costa. A modelação dos processos costeiros que governam a dinâmica sedimentar na interface mar-terra foi realizada com o software XBeach integrado no sistema de modelação SWAN+Delft3D.

**Palavras-chave:** Agitação Marítima, Alterações Climáticas, Erosão Costeira, Ferramentas Hidroinformáticas, Modelação Morfodinâmica.

**ABSTRACT:** This paper presents a modelling work of three coastal stretches at the Northwest coast of Portugal. The implementation, calibration and validation methodologies of wave propagation models and extreme levels simulation for different climate change scenarios are presented for three coastal stretches and the short term morphodynamics is presented for one of the beaches. SWAN software is applied for the implementation of a regional coastal model of the Iberian Peninsula, which enables the application of a dynamic downscaling methodology for global (atmospheric and oceanic) model results, allowing the use of local models of high spatial resolution (Delft3D). The interaction of the two coupled models allows simulating the propagation of waves to near shore locations. Modelling of sediment dynamics at the sea-land interface was performed using XBeach software integrated with the SWAN + Delft3D modelling system.

**Keywords:** Sea state, Climate change, Coastal erosion, Hydroinformatics tools, Morphodynamic modelling.

## 1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre os processos morfodinâmicos é essencial para os estudos em Engenharia Costeira. Embora possuam uma elevada complexidade, só o conhecimento aprofundado destes processos permite uma ação decisiva na valorização e conservação de um território de reconhecida importância estratégica (Pinho, 2017). O estudo dos processos de erosão na costa portuguesa, pelas suas especificidades, constitui uma oportunidade para que a comunidade técnica e científica possa desenvolver metodologias e soluções inovadoras que poderão ser replicadas noutros locais de estudo.

As zonas costeiras apresentam-se como sistemas complexos da interface terra-oceano de elevado valor ecológico e económico. Estas zonas são geralmente, e cada vez mais, densamente povoadas e vulneráveis aos impactos climáticos e oceânicos. Na Europa, apesar dos esforços e investimentos em proteção costeira, cerca de 15% das zonas costeiras estavam ativamente regredindo em 2004, causando graves perdas de território e de bens (Pranzini e Williams, 2013). A erosão costeira e o concomitante risco de inundação são, portanto, questões importantes, particularmente à luz das expectáveis alterações climáticas com a provável elevação do nível médio da água do mar que, tal como a ocorrência de tempestades, podem resultar num aumento das taxas de evolução da erosão costeira.

A análise da vulnerabilidade das zonas costeiras e da sua evolução ao longo do tempo, em consequência dos fatores ambientais é essencial em termos de ordenamento territorial planeado, uma vez que permite considerar valores humanos, económicos, ecológicos e culturais neste território específico, simultaneamente com a sua dinâmica intrínseca. Em particular, a vulnerabilidade das zonas costeiras às ações do mar pode ser entendida como a predisposição a um dado risco, englobando diversos elementos e conceitos, como a sensibilidade ou suscetibilidade ao dano e a falta de capacidade de adaptação (IPCC, 2014).

O sucesso na gestão da zona costeira depende sobretudo da possibilidade de aquisição e consolidação do conhecimento sobre os processos que determinam os riscos costeiros. Com este trabalho pretende-se contribuir para o preenchimento de lacunas de conhecimento e para o desenvolvimento de ferramentas que tirem partido de dados de monitorização e resultados de modelos de larga escala de modo a convergirmos para a produção de plataformas hidrodinâmicas com potencial de fornecimento de serviços de previsão das consequências de eventos extremos. Os resultados obtidos com estas ferramentas podem ser utilizados em planeamento e gestão, por decisores e outras entidades que desenvolvam

atividades ligadas aos ambientes costeiros e ao mar.

O presente trabalho apresenta resultados da aplicação de uma metodologia de modelação hidrodinâmica e morfodinâmica dos processos costeiros em cenário de alterações climáticas, aplicado aos casos de estudo das localizações estuarinas dos rios Lima e Minho e da praia de Belinho. A metodologia adotada parte da realização de um *downscaling* integrado dinâmico de modelos regionais de propagação da agitação marítima da Península Ibérica até modelos locais costeiros de elevada resolução espacial.

## 2. METODOLOGIA

Para a modelação hidro-morfodinâmica das zonas costeiras em estudo optou-se pelo desenvolvimento de modelos regionais de simulação da propagação da agitação marítima numa primeira fase. Estes modelos regionais permitem estabelecer condições de fronteira para os modelos locais, devendo ser adequados à simulação dos processos relevantes para a avaliação dos riscos costeiros, incluindo propagação da agitação, ação da maré e vento (Santos *et al.*, 2018).

Para a criação dos modelos regionais, foi utilizado o *software* SWAN (SWAN, 2018). Este programa permite implementar modelos para simular a propagação da agitação marítima registada ou estimada por outros modelos até localizações próximas da costa (águas profundas a intermédias), considerando os processos físicos de refração, difração e empolamento causados por diversos fatores, nomeadamente: variações batimétricas, correntes, ação do vento, rebentação e dissipação de energia devido ao atrito do fundo.

Para a simulação integrada da propagação da agitação e correntes costeiras resultantes da ação do vento e maré, foi utilizado o *software* Delft3D (Deltares, 2018). Este programa permite simular processos que envolvem correntes, agitação (com recurso ao modelo SWAN) e transporte sedimentar.

Os modelos costeiros locais foram implementados com o modelo numérico XBeach (Roelvink *et al.*, 2009). Este modelo inclui processos hidrodinâmicos de propagação e transformação da agitação (refração, empolamento e rebentação) e de propagação e transformação de ondas infragravíticas (geração, propagação e dissipação), bem como o galgamento e a inundação em praias. Inclui também processos morfodinâmicos que permitem simular a configuração do fundo induzida pelas ondas e pelas correntes, através da simulação do transporte de sedimentos por arrastamento e em suspensão, e da eventual erosão da duna frontal. Os efeitos da vegetação e de estruturas não erodíveis também podem ser considerados.

No âmbito deste trabalho foram implementados, calibrados e validados modelos regionais de propagação de agitação marítima com o *software* SWAN, assim como modelos locais de elevada resolução espacial com o programa Delft3D que permitem, ao funcionarem de uma forma integrada, caracterizar o regime de agitação marítima e correntes costeiras em pontos próximos dos locais em estudo. Para tal, os modelos regionais da zona costeira da Península Ibérica utilizam como condições em fronteiras abertas os espectros de onda resultantes do modelo oceânico WaveWatch III (WWIII) (Tolman, 2002), conjugados com informações relativas aos campos de vento e pressão atmosférica da base de dados Europeia ECMWF (Dee *et al.*, 2011). Realiza-se, assim, o *downscaling* dos resultados da agitação marítima obtidos com aqueles modelos para a escala dos modelos locais implementados para as embocaduras dos rios Lima e Minho e para um local situado na proximidade da praia de Belinho. Os modelos costeiros XBeach utilizam como condições de fronteira o espectro resultante dos modelos locais na respetiva localização, permitindo assim realizar a simulação correspondente dos processos morfodinâmicos nas praias. O esquema que se apresenta na Figura 1 sintetiza a metodologia aplicada no presente trabalho.

### 3. ÁREA DE ESTUDO

A zona costeira, objeto do presente trabalho, situa-se na região Noroeste de Portugal, compreendendo geograficamente os distritos de Viana do Castelo, Braga, Porto e o norte do distrito de Aveiro (Figura 2). Esta

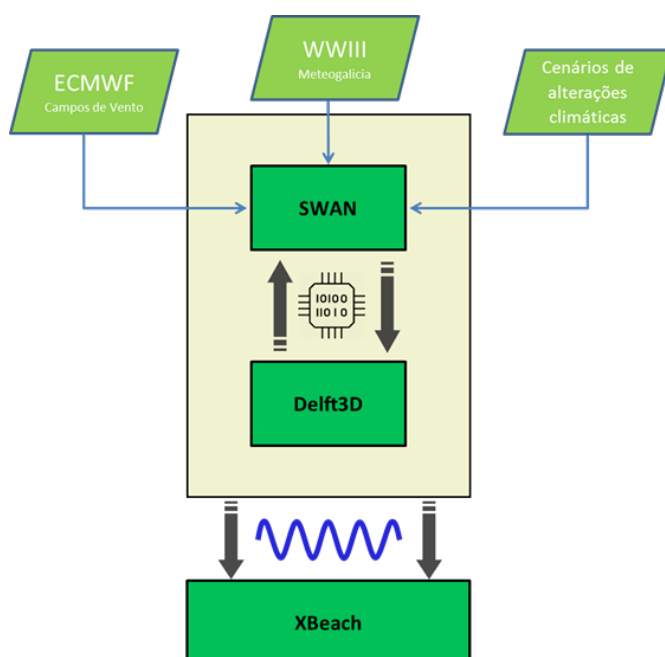


Figura 1. Metodologia de integração de modelos – esquema conceptual.

região litoral confronta, a norte com Espanha e a sul com a região do Centro de Portugal.

Para uma análise mais detalhada dos processos costeiros que governam a dinâmica sedimentar foram selecionados três locais piloto: as zonas costeiras adjacentes aos rios Minho e Lima (praias de Moledo e Cabedelo, respetivamente) constituídos por praias arenosas; e a praia de Belinho, constituída essencialmente por sedimentos de seixos e calhaus.

## 4. MODELAÇÃO HIDRO-MORFODINÂMICA

### 4.1 Modelo regional

A modelação numérica foi aplicada para simular, à escala regional, a propagação da agitação marítima, utilizando como condições de fronteira os dados disponíveis da boia ondógrafo Alfredo Ramalho (Observatório Raia, 2019) (localização: 41° 08.910'N, 09° 34.906'W), assim como espectros de onda resultantes do modelo WWIII.

Este modelo regional da Península Ibérica (Figura 3) permite simular a propagação das ondas desde águas profundas até à costa e caracterizar o regime de agitação ao longo das áreas de estudo. Para a implementação do modelo foi utilizada uma grelha de resolução com 0,05°, batimetria GEBCO (GEBCO, 2018) para zonas intermédias e batimetria resultante de levantamentos batimétricos para as zonas adjacentes aos estuários do rio Lima e rio Minho, realizados em 2016.

A informação relativa aos registos de vento e pressão atmosférica foi consultada na base de dados do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas, sendo que as constantes harmónicas das marés foram consultadas na base de dados TPXO 7.2 (Egbert e Svetlana, 2002). A partir destas constantes que podem ser obtidas para qualquer ponto do oceano é possível prever a elevação do nível do mar produzida pela maré astronómica.

### 4.2 Modelos locais

Os modelos locais, de elevada resolução, que permitem simular níveis da água do mar e a propagação da agitação marítima nas zonas costeiras dos locais de estudo, foram implementados para as zonas adjacentes aos estuários dos rios Minho e Lima e praia de Belinho.

Estes modelos (Figura 3) foram implementados utilizando uma grelha de resolução com 50 m de lado, batimetria resultante de campanhas de levantamentos batimétricos para as zonas adjacentes aos estuários, complementadas com dados LiDAR e informações batimétricas GEBCO para zonas mais profundas.

Acoplados ao modelo regional, os modelos locais utilizam nas respetivas condições de fronteira os

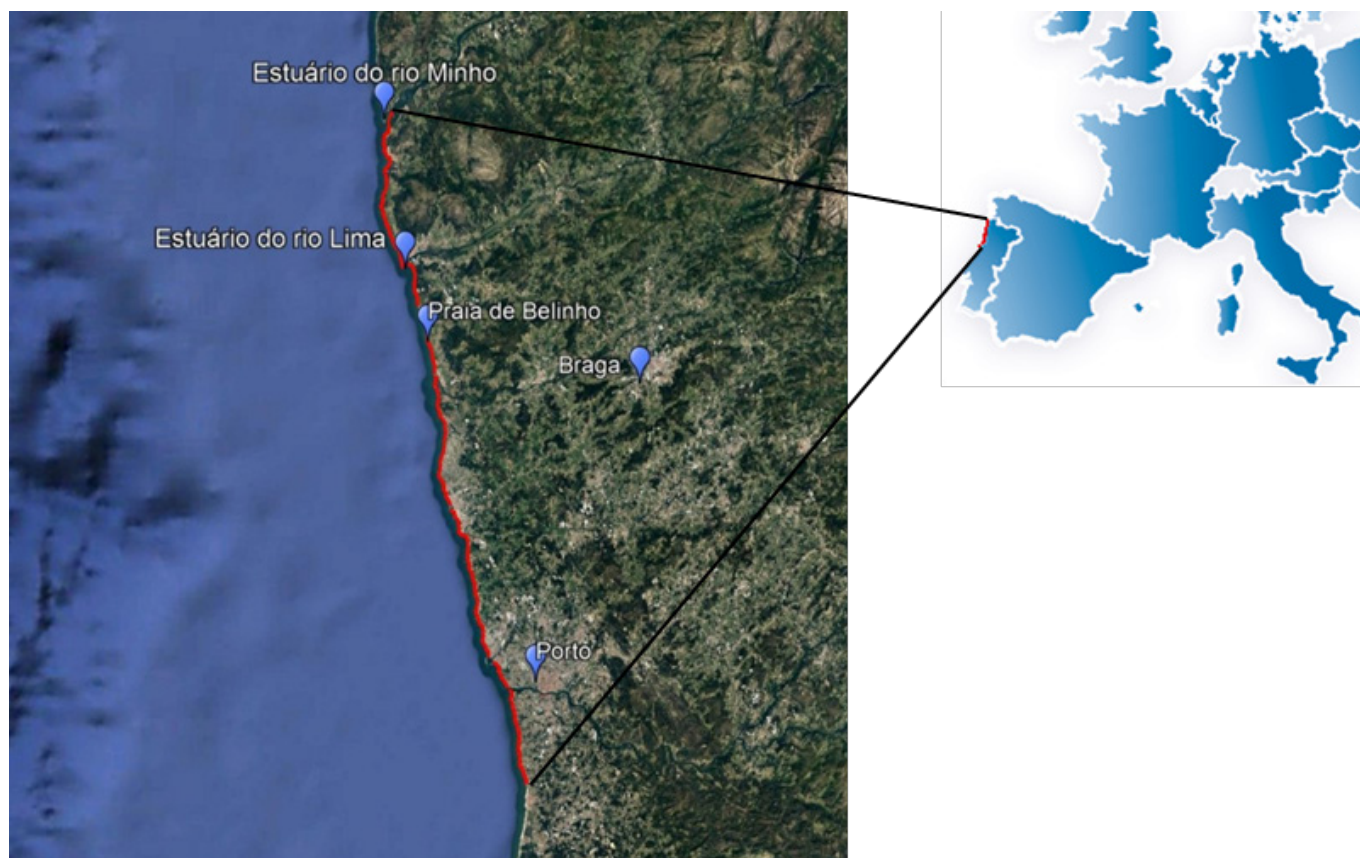


Figura 2. Localização da área de estudo.

resultados obtidos no modelo regional, funcionando, de forma integrada, os modelos de diferentes escalas.

### 4.3 Modelos costeiros

Os modelos costeiros XBeach para as três localizações em estudo (praia de Moledo, praia do Cabedelo e praia de Belinho) foram implementados segundo perfis unidimensionais selecionados em cada uma das praias (Figura 4). Para a construção destes modelos foi realizado trabalho de campo que permitiu a recolha de dados topográficos das praias emersas assim como a recolha e análise granulométrica de amostras de sedimentos para a caracterização da dimensão dos sedimentos nos locais em estudo. Como informação batimétrica foram utilizados dados resultantes de campanhas de levantamentos batimétricos disponíveis para as localizações em estudo complementados com a batimetria LiDAR.

## 5. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS

A comparação de resultados dos modelos com medições é indispensável para estimar os valores dos parâmetros de calibração e avaliar o desempenho dos modelos criados. O processo de calibração e validação desenvolveu-se em três fases: a) calibração tendo por base uma análise de

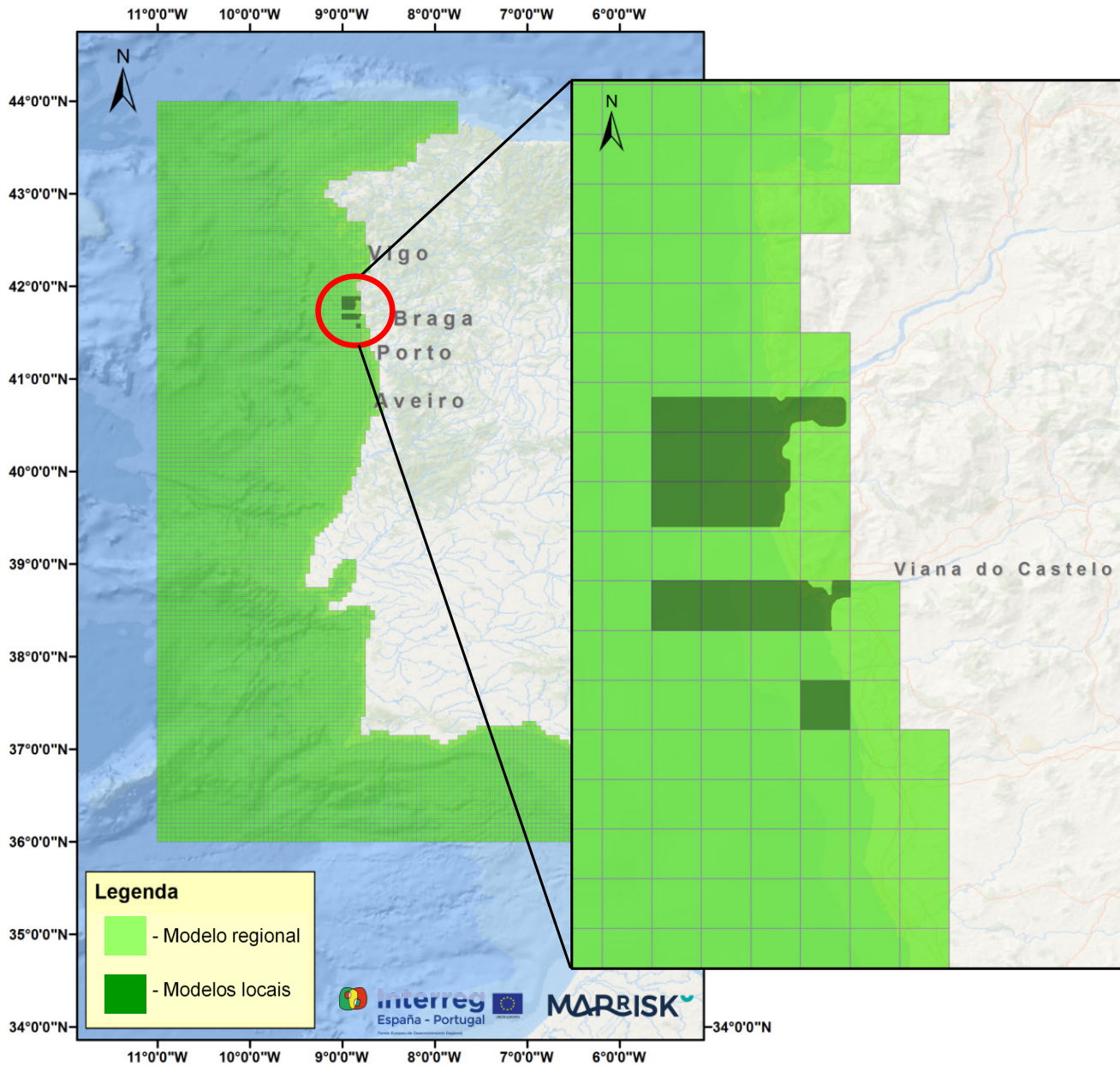
sensibilidade dos resultados aos valores adotados para os parâmetros de calibração; b) validação do modelo regional utilizando como cenários de validação duas simulações em que se recorre a duas fontes de dados distintas para imposição das condições de fronteira; e c) validação dos modelos locais utilizando registos do marégrafo de Viana do Castelo.

#### a) Calibração dos modelos

Para a calibração dos modelos foi realizada uma estimação dos valores dos parâmetros de calibração tendo por base análises de sensibilidade das diferentes variáveis do modelo (Nikishova et al., 2017). No modelo espectral de terceira geração SWAN foi utilizado um coeficiente *JONSWAP* de 0,067  $m^2s^3$ , tendo os coeficientes de atrito associados à atuação do vento sido definidos com os valores propostos por defeito no programa. No modelo hidrodinâmico Delft3D adotou-se um valor de 65  $m^{1/2}s^{-1}$  para o coeficiente de Chezy e o valor de 1  $m^2s^{-1}$  para o coeficiente de difusão turbulenta.

#### b) Validação do modelo regional

A validação de modelos consiste na avaliação do modelo calibrado aplicando-o a diferentes cenários de simulação. Para avaliar a qualidade do ajuste entre os



Coordinate System: ETRS 1989 Portugal TM06

Figura 3. Discretização espacial do modelo regional e localização dos modelos locais encaixados.

vários parâmetros da agitação marítima observados e os resultados das simulações, foram utilizadas diferentes métricas quantificadas com base em séries de valores medidos e simulados.

Foram considerados dois cenários de validação distintos. No primeiro cenário considerou-se uma simulação correspondente ao período de um ano (1 de Janeiro de 2011 a 31 de Dezembro de 2011) com resolução temporal de 6 horas. Como condições de fronteira utilizou-se a informação da base de dados SONEL (Bertin *et al.*, 2013; Dodet *et al.*, 2018), campos de vento ECMWF e informação das marés astronómicas da base de dados TPXO 7.2, e

considerou-se um local de validação coincidente com o ponto de coordenadas 9°W, 41.5°N para o qual existem registos na mesma base de dados. Na Figura 5 encontram-se os resultados da validação do modelo para a altura significativa, assim como as correspondentes métricas de desempenho.

A Figura 6 apresenta os resultados da mesma simulação para os parâmetros de agitação marítima (período e direção) assim como as correspondentes métricas de desempenho do modelo.

Os resultados obtidos revelam um bom desempenho em termos de simulação das alturas de onda significativas da

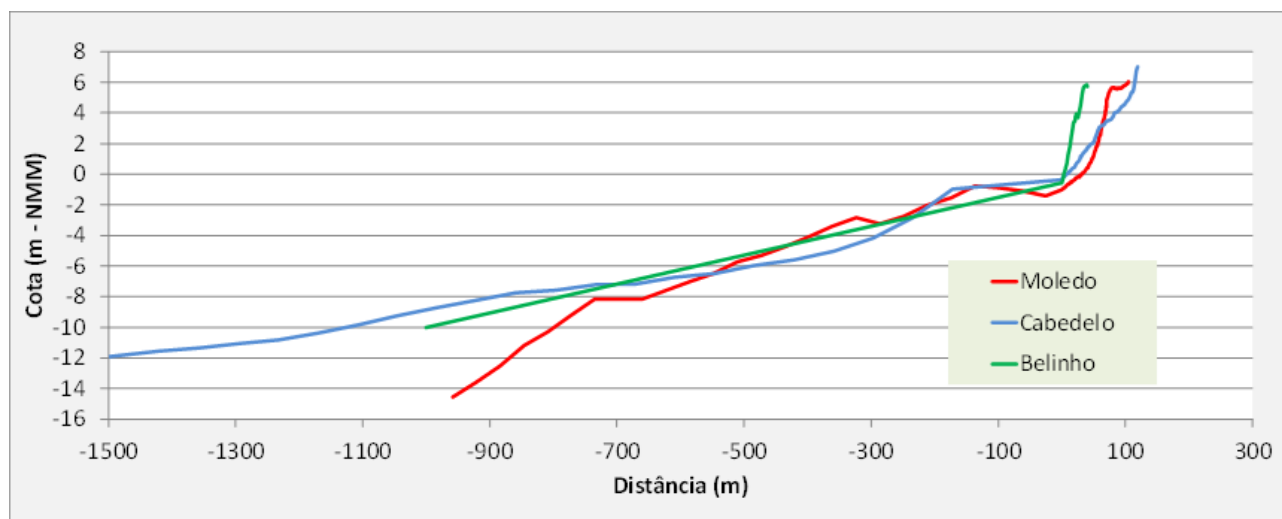


Figura 4. Perfis utilizados na construção dos modelos XBeach das praias de Moledo, Cabedelo e Belinho.

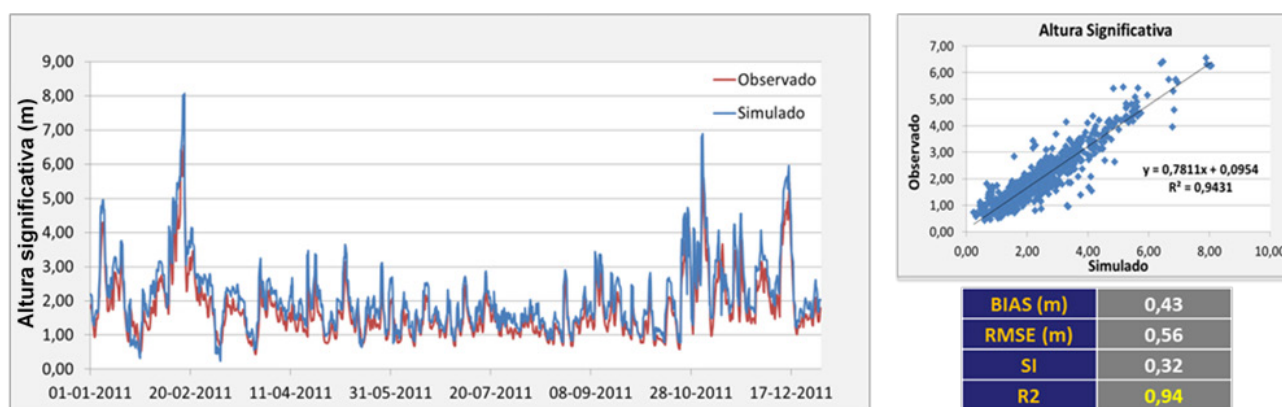


Figura 5. Resultado do cenário de validação do parâmetro altura de onda significativa utilizando a base de dados SONEL para as condições de fronteira.

agitação marítima e resultados razoáveis para o período e direção. De facto, no primeiro caso e para o período da simulação considerado (um ano), o coeficiente de determinação é de 0,94 quando se comparam os valores simulados com os observados. A média das diferenças (BIAS) é de 0,43 m, a raiz quadrada da média dos quadrados das diferenças (RMSE) é de 0,56 m e o índice de dispersão (SI) é de 32%. O coeficiente de determinação quando se comparam as direções simuladas com as observadas é de 0,66 e, no que se refere ao período, é de 0,58.

No segundo cenário de validação considera-se um período de um mês (janeiro de 2018) com resolução temporal de 1 hora. Como condições de fronteira utiliza-se a informação da boia ondógrafo Alfredo Ramalho, campos de vento ECMWF e informação das marés astronómicas da base de dados TPXO 7.2. A validação foi realizada com registos relativos a valores observados na boia de Leixões. Na Figura 7 apresentam-se os resultados da simulação relativos à altura de onda significativa da agitação

marítima, assim como as métricas de desempenho do modelo nesta simulação.

A Figura 8 apresenta os resultados da mesma simulação para a direção e período da agitação marítima e as métricas correspondentes de desempenho do modelo.

Como se pode observar, os resultados obtidos neste cenário, envolvendo registos horários, revelam que o modelo poderá ser utilizado na caracterização da agitação marítima em locais próximos da costa, com erros razoáveis, quer em termos da quantificação da altura de onda significativa quer da respetiva direção e do período.

#### c) Validação dos modelos locais

O cenário de validação dos modelos locais considerou o período de 1 mês (1 de agosto de 2014 a 31 de agosto de 2014) com resolução temporal de 1 hora e utilizou como condições de fronteira os resultados obtidos no modelo regional para o mesmo período. Foram utilizados os dados de vento obtidos no ECMWF e informação das marés

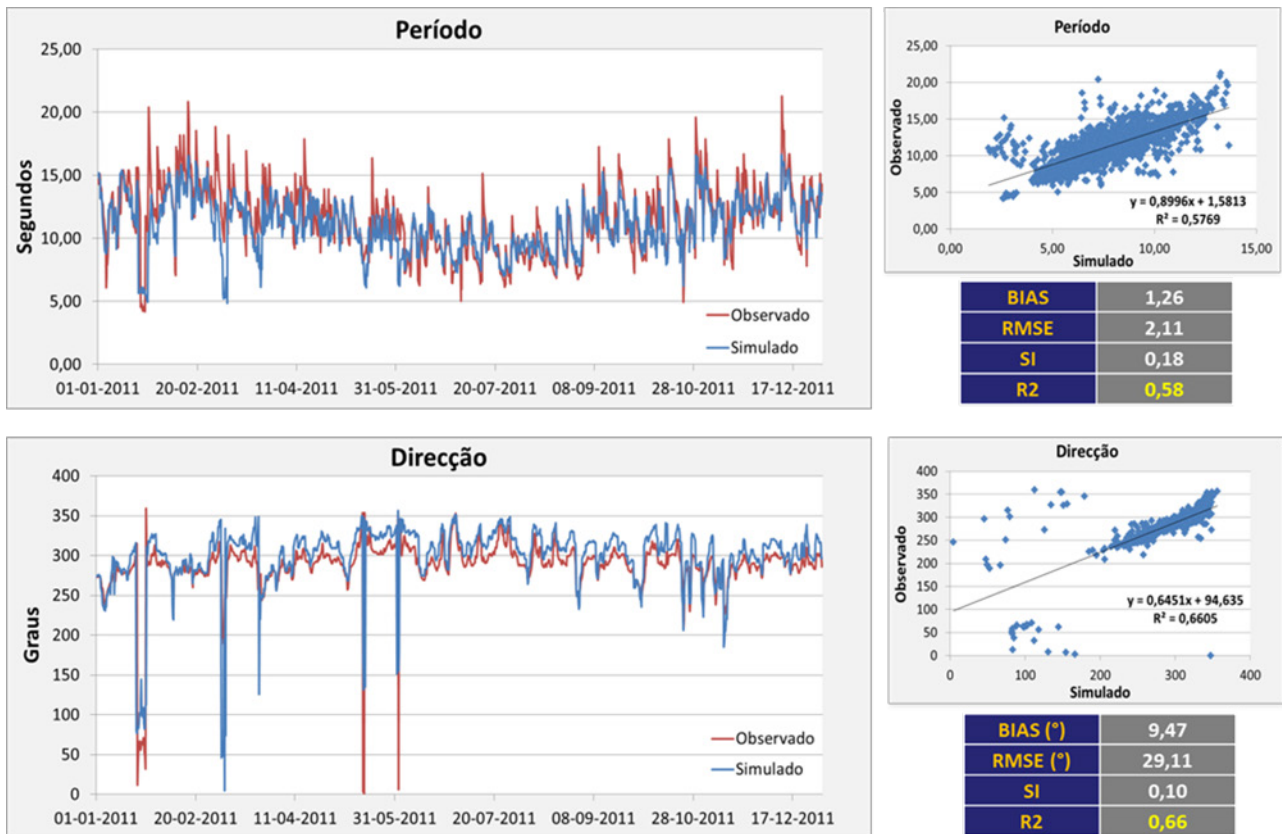


Figura 6. Resultado do cenário de validação dos parâmetros de agitação marítima (período e direcção) utilizando a base de dados SONEL para as condições de fronteira.



Figura 7. Resultado do cenário de validação do parâmetro altura de onda significativa utilizando dados da boia ondógrafo Alfredo Ramalho como condições de fronteira.

astronómicas da base de dados TPXO 7.2, sendo utilizado como ponto de validação o marégrafo de Viana do Castelo (41°41'6"N, 8°50'24"W).

Na Figura 9 encontram-se os resultados da validação do modelo para o nível de maré.

Em conformidade com os resultados de validação do modelo regional, os resultados obtidos no cenário de validação dos modelos locais revelam uma boa

correlação com valores medidos, permitindo a aplicação dos mesmos para a simulação deste tipo de eventos normalmente caracterizados por uma elevada incerteza.

Apesar dos esforços recentes na obtenção de medições contínuas das características da agitação marítima através da colocação de sensores ao largo, os resultados dos modelos só poderão ser melhorados se for possível a correspondente obtenção de registos junto à costa.

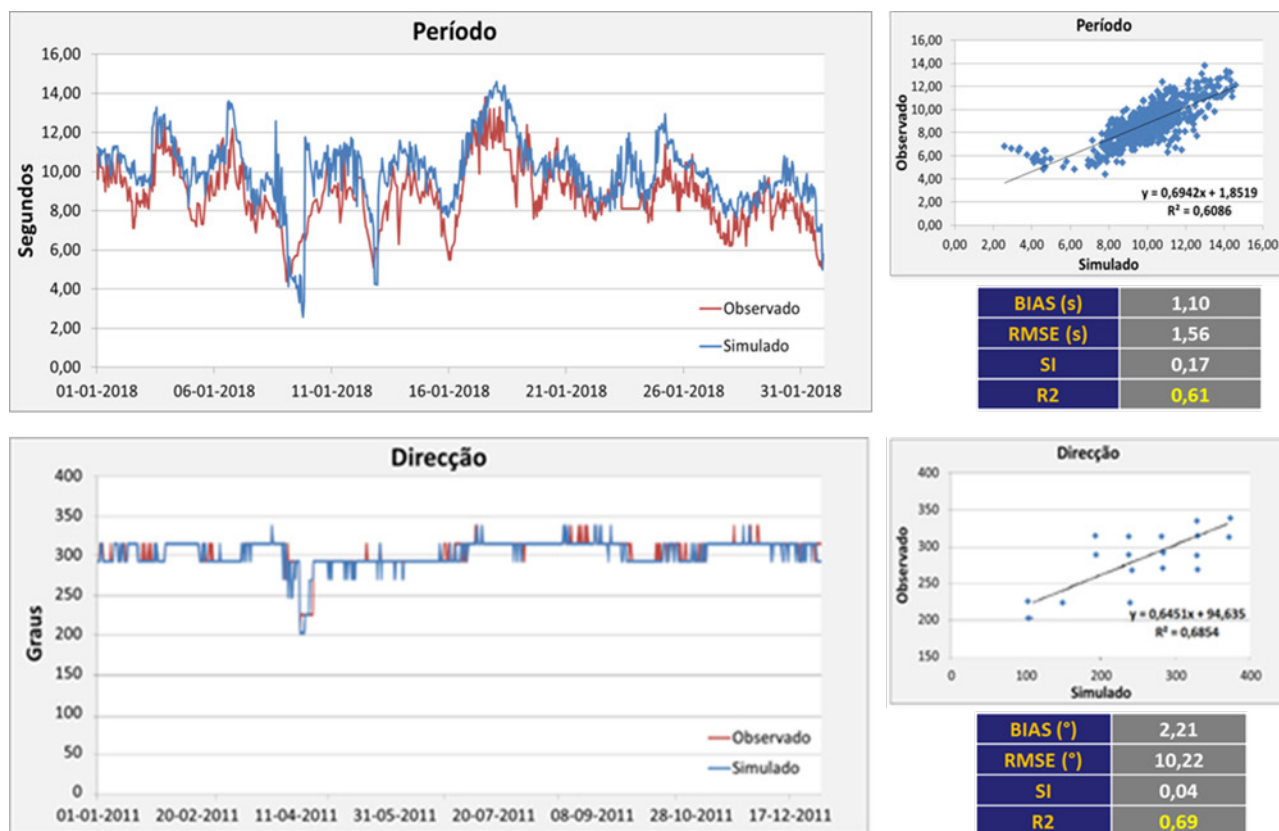


Figura 8. Resultados do cenário de validação do modelo para o período e direção da agitação marítima utilizando dados da boia onógrafa Alfredo Ramalho como condições de fronteira.

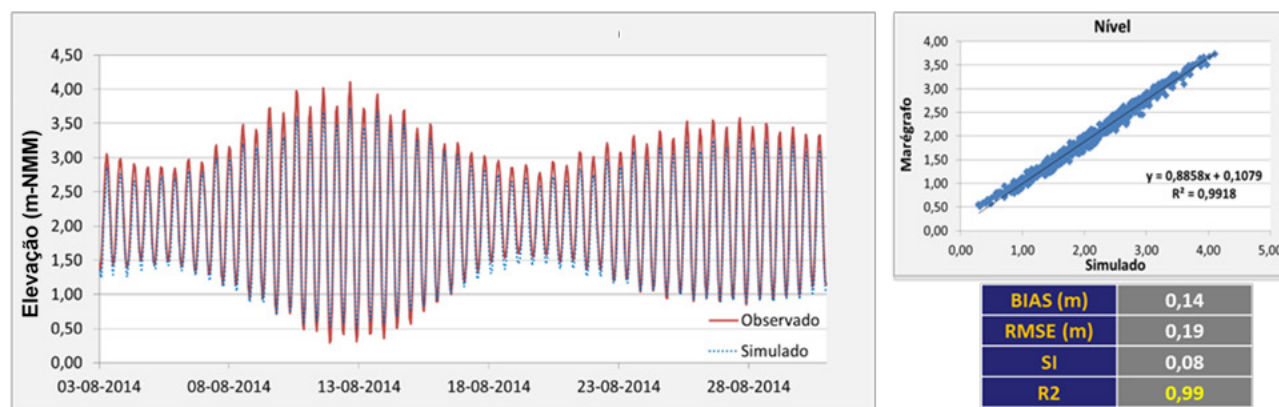


Figura 9. Resultados do modelo local, utilizando como ponto de validação o marégrafo de Viana do Castelo.

Acresce a necessidade de melhoria (em precisão e resolução) da informação batimétrica disponível para a implementação de modelos.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a caracterização do regime de agitação marítima nos locais de estudo na proximidade dos estuários dos rios Minho e Lima e da praia de Belinho, foi realizada a simulação da propagação da agitação marítima registada

no ano de 2004 ao largo da costa da Península Ibérica. O modelo utilizou como condições impostas nas fronteiras abertas os espectros de agitação resultantes do modelo oceânico WWIII, realizando a propagação da agitação marítima até às fronteiras dos modelos locais de elevada resolução espacial.

São apresentados resultados da quantificação do regime de agitação marítima, sob a forma de rosa de agitação marítima, em quatro localizações correspondentes às



áreas de estudo (Figura 10). As localizações A, B e C encontram-se distantes 500 m da batimétrica -2 m (NMM); as localizações D situam-se nas embocaduras do rio Lima e Minho. Apresenta-se também o resultado da quantificação do regime de agitação marítima para uma localização próxima da praia de Belinho.

Como era expectável, a agitação marítima incidente ao largo sofre alterações significativas ao aproximar-se da costa, com variações espaciais significativas em termos de direções atuantes e alturas de onda significativas. Os resultados obtidos permitem estabelecer as condições de fronteira dos modelos morfodinâmicos implementados com o *software* XBeach.

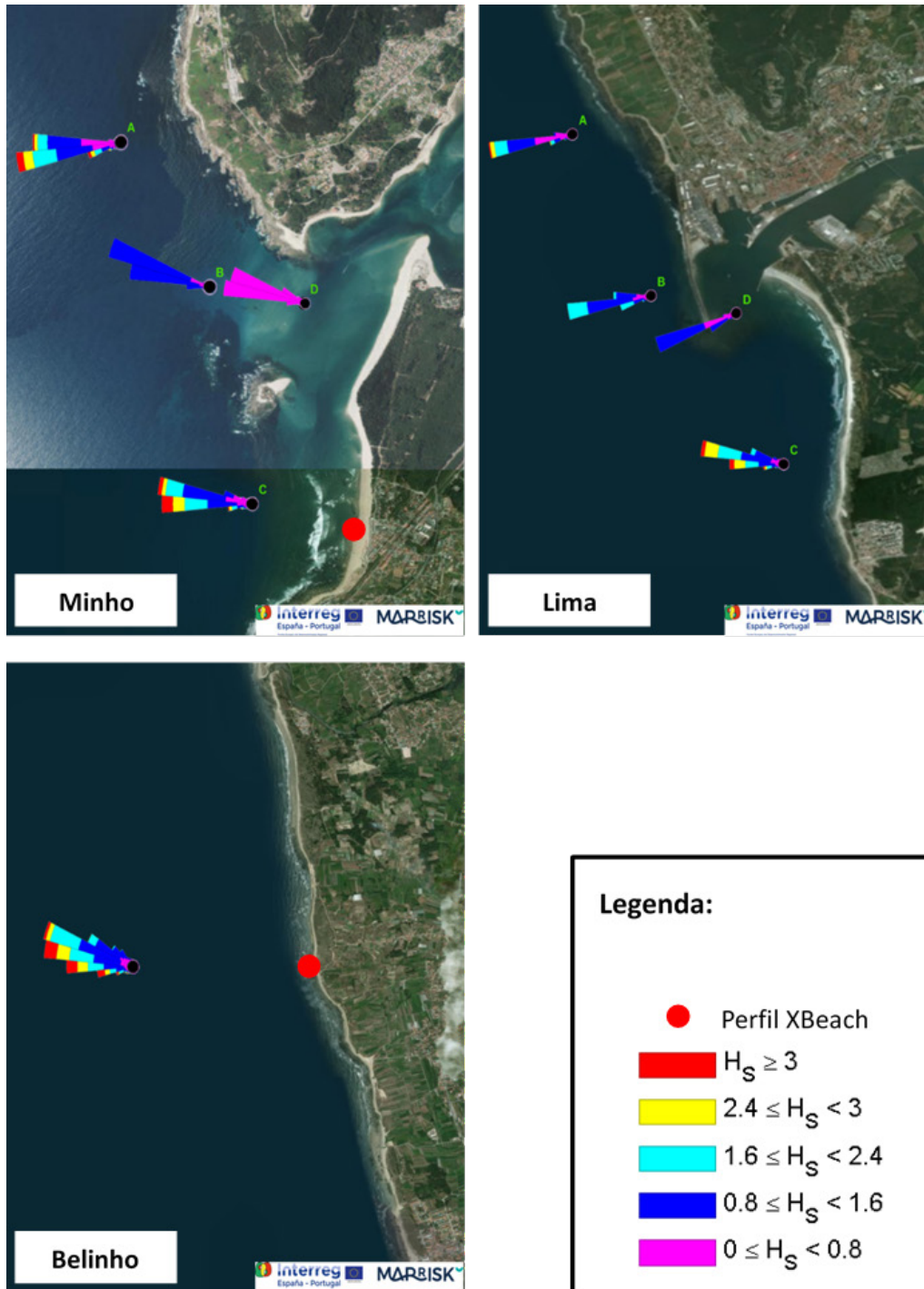


Figura 10. Distribuição da altura de onda significativa e direções da agitação marítima nas áreas de estudo do rio Minho (painel superior esquerdo), rio Lima (painel superior direito) e praia de Belinho (painel inferior esquerdo) obtidas a partir de resultados de modelação hidrodinâmica.

Para a modelação dos processos costeiros que governam a dinâmica sedimentar na interface mar-terra, foi selecionado o evento de tempestade com maior magnitude ocorrido no ano de 2004 (a 8 de janeiro). Para este evento foram considerados seis diferentes cenários de simulação: o cenário 1 pretende simular a tempestade ocorrida com o nível do mar observado; o cenário 2 pretende simular os efeitos da tempestade caso esta tivesse ocorrido durante a preia-mar; e os cenários 3 a 6 consideram projecções RCP do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de níveis extremos do mar (Vousdoukas *et al.*, 2017). Os níveis considerados correspondem aos valores estimados para períodos de retorno de 100 anos (Tabela 1) e incluem o efeito da maré, da sobre-elevação de tempestade e do *wave-setup*.

Tabela 1. Previsões dos níveis extremos do mar nos cenários climáticos RCP 4.5 e RCP 8.5 para as localizações consideradas.

	Níveis extremos do mar (m)				
	Históricos	RCP 4.5 2050	RCP 4.5 2100	RCP 8.5 2050	RCP 8.5 2100
Cenário 1	0.2	-	-	-	-
Cenário 2	1.3				
Cenário 3	3.0	-	-	-	-
Cenário 4	-	3.2	-	3.2	-
Cenário 5	-	-	3.5	-	-
Cenário 6	-	-	-	-	3.7

Uma vez que nas estimativas realizadas e utilizadas neste trabalho é previsto o mesmo nível extremo do mar em 2050, tanto no cenário climático RCP4.5 como no RCP8.5, o cenário 4 corresponde a estas duas previsões. São apresentados resultados das envolventes de níveis máximos e mínimos para os diferentes níveis da água do mar e para uma tempestade com características idênticas à tempestade mais intensa ocorrida no ano de 2014. Para a determinação do *run up*, o modelo regista a variação do nível da superfície livre, incluindo o espraio. Na Figura 11 apresentam-se resultados para a praia de Moledo.

Dos resultados apresentados salienta-se o facto de já na atualidade, a verificar-se simultaneidade de tempestades coincidentes com níveis extremos no mar (cenário 3), se atingir o topo da duna frontal no perfil considerado para a praia de Moledo (nível máximo de *run up* simulado 5,7 m (NMM)). Nos cenários correspondentes a situações futuras (2050 e 2100) um evento como o ocorrido em 8 de janeiro de 2014 simulado neste trabalho conduziria a galgamentos com níveis de *run up* crescentes. O valor máximo atingido seria de 6,2 m (NMM).

Importa realçar que para os cenários de longo termo (cenários 4 a 6) e à medida que sobe o nível médio do mar, é muito pouco provável que o perfil de praia mantenha as suas características geométricas tal como foi considerado nas simulações realizadas. A simulação deste processo está ainda fora do alcance dos programas de modelação morfodinâmica, sobretudo pelas limitações que resultam da dificuldade em simular os eventos acretivos (Jongedijk, 2017).

Na Figura 12 apresentam-se os resultados de níveis extremos simulados para a praia do Cabedelo em Viana do Castelo.

Os resultados obtidos revelam por um lado a influência dos molhes da embocadura do rio Lima, fazendo com que a agitação incidente na praia analisada se apresente menos energética, e por outro a dissipação da agitação marítima antes de atingir a duna frontal, devido às características morfológicas do perfil de praia. Os níveis extremos de *run up* variam entre 4,1 m (NMM) no cenário 3 correspondente a coincidência de eventos extremos com características atuais e 4,8 m (NMM) no cenário 6 - RCP8.5 em 2100.

Apesar de não ter sido realizada a validação dos níveis para esta localização, tal como no caso da praia de Moledo, os resultados das inundações obtidas em ambos os casos, coincidem com eventos de tempestade ocorridos no passado. No caso da praia de Moledo, são conhecidos registos históricos de galgamentos com inundações ocorridos nesta praia, tal como obtido com as simulações. Na praia do Cabedelo desconhecem-se eventos de galgamentos, tal como simulado nos resultados apresentados.

Os resultados obtidos para a praia de Belinho são apresentados na Figura 13. Neste caso, tal como na praia de Moledo, estamos em presença de uma praia exposta, refletiva. Atualmente é composta por seixos e calhaus, com génese muito recente, defendendo de modo natural as dunas localizadas imediatamente no tardoz dos depósitos de seixos (Gomes *et al.*, 2018).

Os níveis de *run-up*, nas condições atuais, poderão atingir o valor de 6,3 m (NMM), galgando assim o depósito de seixos e atingindo a formação dunar. Estes níveis agravam-se nos cenários representativos de alterações climáticas (cenários 4 a 6) atingindo o valor máximo de 6,6 m (NMM). Importa mais uma vez realçar, que nestes resultados se pressupõe que o perfil de praia é o mesmo nos diferentes cenários simulados.

Esta simplificação é contrariada pelos resultados obtidos quando se considera a simulação da morfodinâmica em simultâneo com a hidrodinâmica mesmo para períodos curtos (duração da ordem de um período de maré). Para o caso da praia de Belinho para além da modelação da hidrodinâmica foi também avaliada a resposta

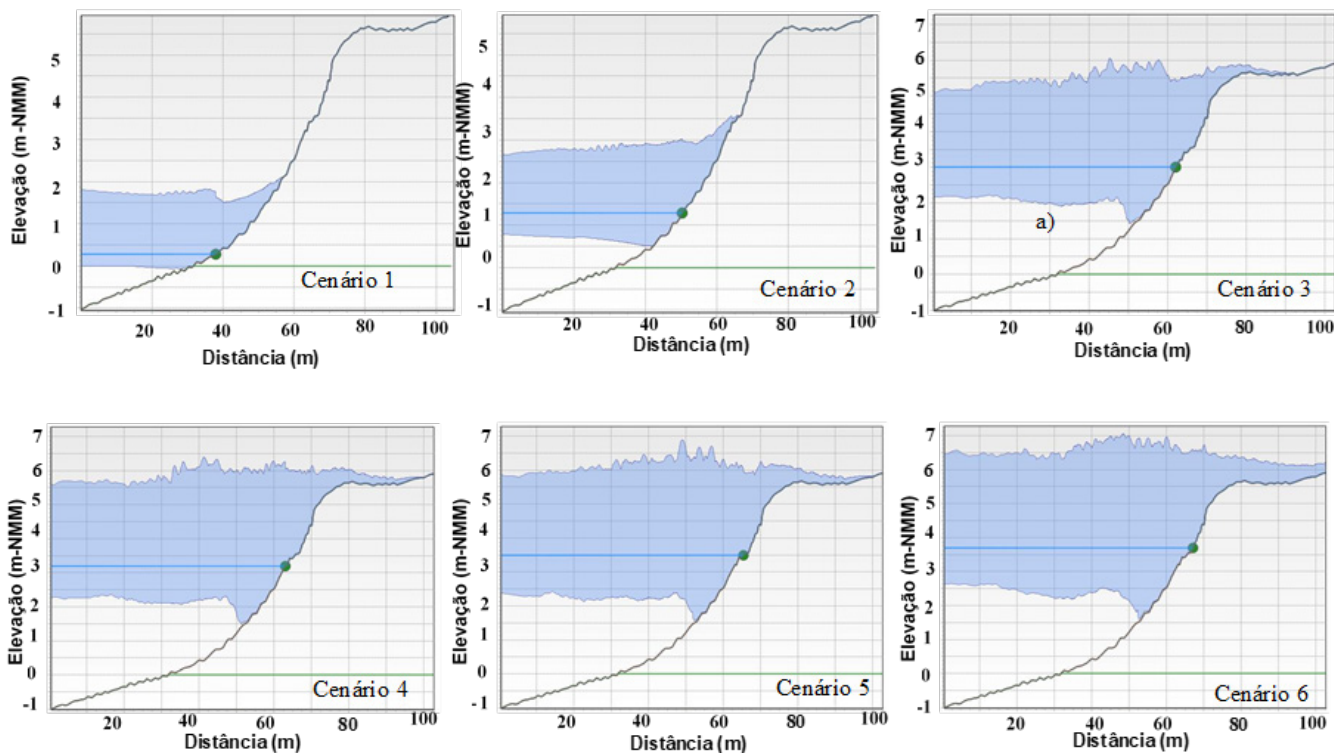


Figura 11. Resultado das simulações de níveis extremos para a praia de Moledo, nos seis cenários considerados (a envolvente assinalada a azul representa os níveis extremos atingidos durante os eventos simulados).

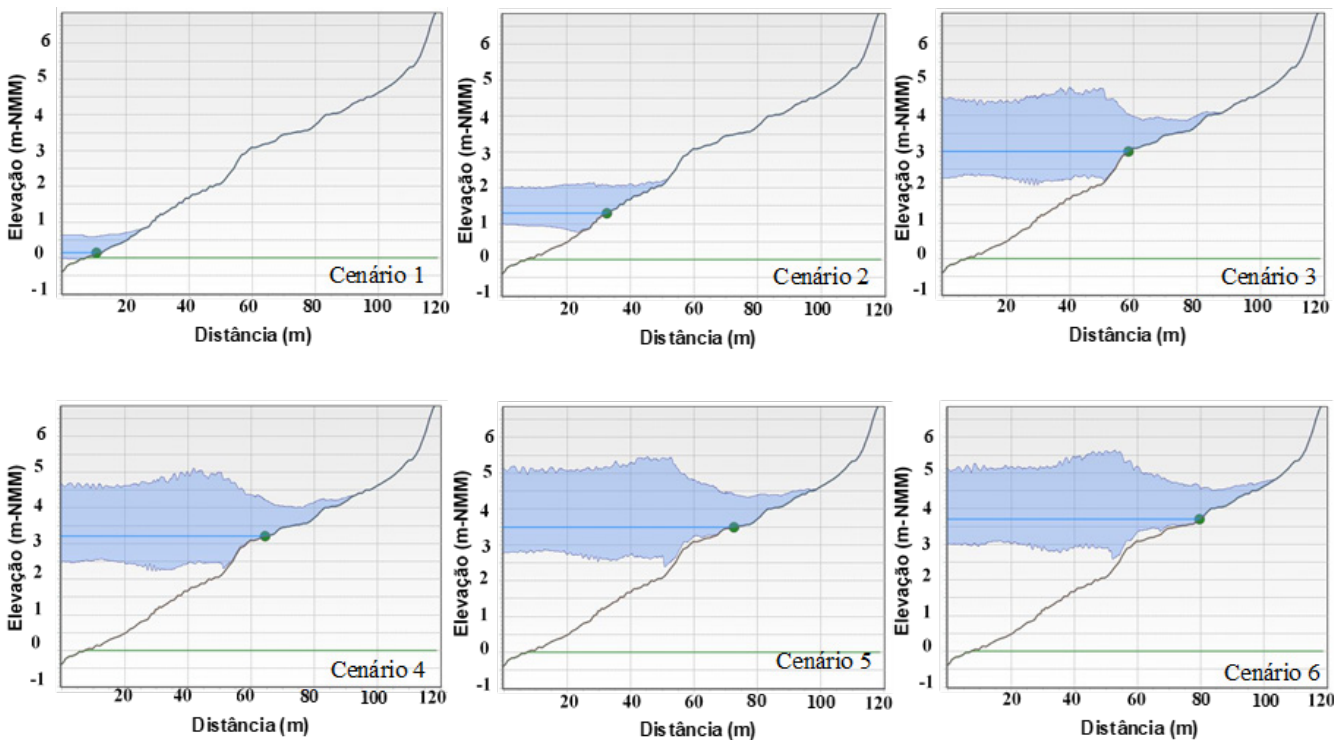


Figura 12. Resultado das simulações de níveis extremos para a praia do Cabedelo, nos seis cenários considerados (a envolvente azul representa os níveis máximos e mínimos atingidos durante os eventos simulados).

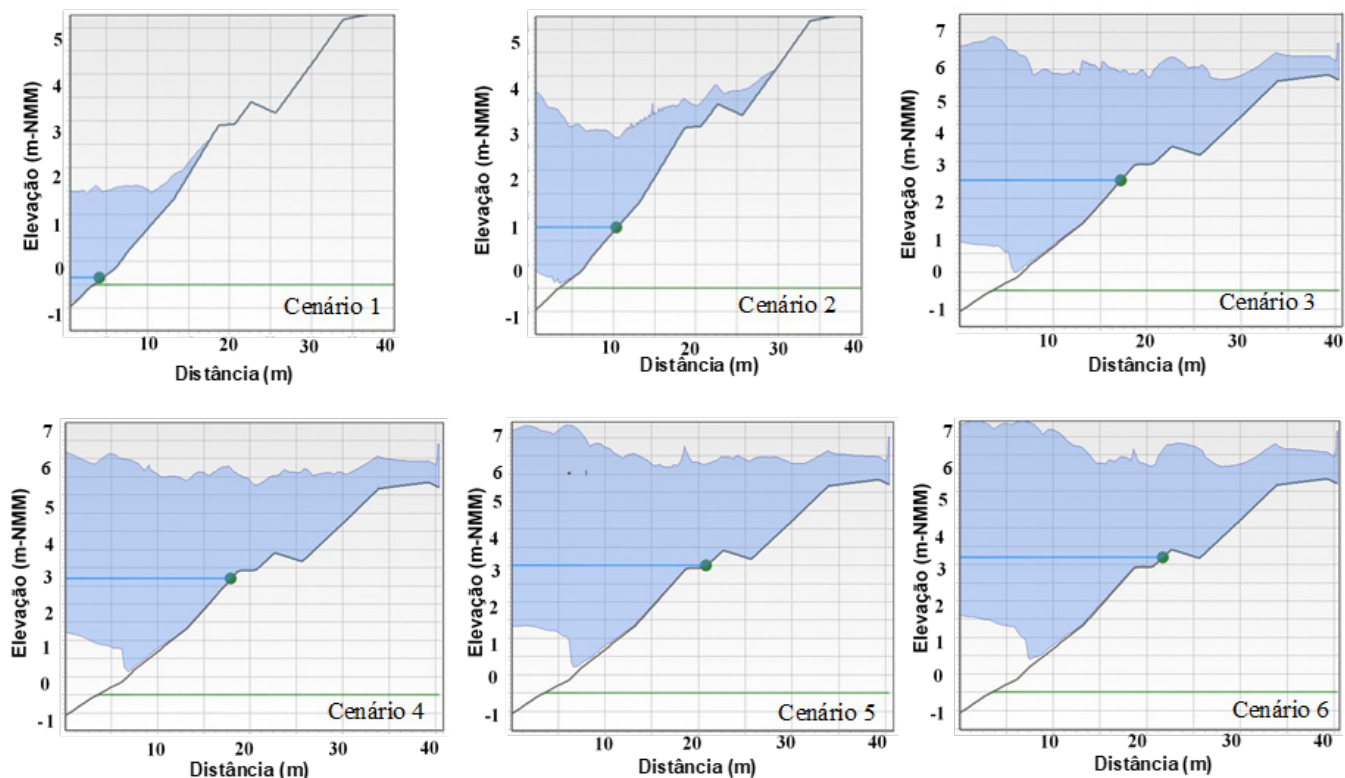


Figura 13. Resultado das simulações de níveis extremos para a praia de Belinho, nos seis cenários considerados (a linha azul representa os níveis máximos e mínimos atingidos pela água do mar).

morfodinâmica desta praia de seixos às ações do mar. A Figura 14 apresenta resultados de dois perfis modelados (P1 e P2) e as respetivas comparações com valores obtidos em levantamentos topográficos sucessivos realizados no dia 16 de maio de 2014 (Gomes *et al.*, 2018).

Os resultados obtidos permitem verificar uma acreção no período monitorizado. A berma intermédia, situada

à cota de 3 m (NMM), registada no início do período de monitorização foi destruída pela ação da agitação. O modelo numérico reproduz o perfil final, partindo-se de uma configuração da praia idêntica à registada inicialmente, considerando as características da maré verificadas na data de medição e características de agitação estimadas.

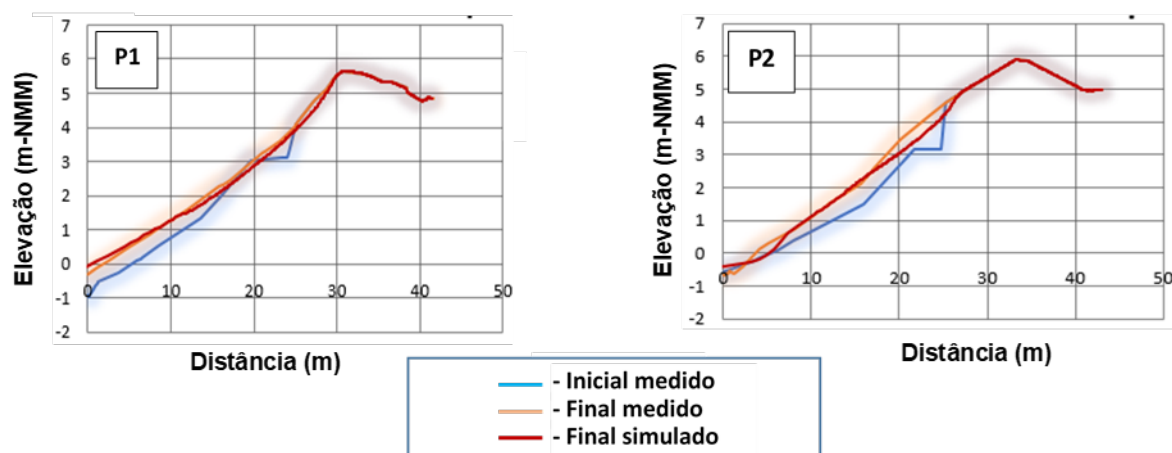


Figura 14. Resultado de simulações morfodinâmicas para o caso de estudo da praia de Belinho e respetivas comparações com valores medidos a 16 de Maio de 2014.

## 7. CONCLUSÕES

As alterações climáticas constituem uma ameaça com potenciais impactos significativos nos atuais padrões climatológicos. À medida que as alterações climáticas se vão evidenciando, através da observação de diferentes variáveis ambientais, torna-se necessário antecipar os seus eventuais impactos para identificar vulnerabilidades e adotar as necessárias medidas de gestão.

No presente trabalho evidenciou-se a importância da utilização de ferramentas hidroinformáticas na previsão de regimes de agitação marítima e de níveis da água do mar (agentes determinantes para a erosão costeira), que podem ser úteis no estabelecimento de medidas de mitigação e de adaptação em cenários de alterações climáticas.

A metodologia adotada compreendeu o desenvolvimento de uma plataforma integrando modelos de âmbito geográfico diferenciado, realizando *downscaling* dinâmico de modelos de larga escala (escala regional) para modelos locais de elevada resolução e modelos costeiros. A plataforma assim criada, permitiu realizar simulações de condições de agitação e níveis extremos do mar em três locais da costa noroeste de Portugal (praia de Moledo, praia do Cabedelo e praia de Belinho), em cenários históricos e em cenários de médio e longo prazo, considerando alterações climáticas projectadas pelo IPCC.

Dos resultados obtidos, retiram-se conclusões que podem ser muito importantes no apoio à gestão futura das zonas costeiras que foram objecto de estudo: (i) os níveis extremos conjugados com eventos intensos de agitação marítima conduzirão a galgamentos nas praias de Moledo e de Belinho; (ii) os molhes da embocadura do rio Lima comportam-se de forma favorável na protecção do galgamento da praia de Cabedelo, tornando-a menos vulnerável aos níveis extremos; (iii) a subida do nível médio da água do mar será inevitavelmente acompanhada de alterações morfodinâmicas das praias (mesmo que ocorram em períodos muito curtos), como demonstrado pelos resultados obtidos nas simulações morfodinâmicas para a praia de Belinho.

A plataforma tecnológica que se apresenta neste trabalho, integrando modelos regionais, locais e costeiros, assume-se como um importante contributo para o estudo da agitação marítima e da evolução da morfodinâmica costeira. A sua alimentação com adequados dados de monitorização permite formular previsões de curto, médio e longo prazo, em cenários com elevados níveis de incerteza que caracterizam as alterações climáticas.

A eficácia desta metodologia, mensurável pelos resultados obtidos nos casos de estudo apresentados,

permite considerá-la com virtualidades para a sua aplicação generalizada noutras zonas costeiras.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao projecto 0262\_MarRISK\_1\_E, o apoio concedido para a realização deste estudo, possibilitando o desenvolvimento e aplicação de ferramentas hidroinformáticas, contribuindo para um melhor conhecimento das condições de resiliência ao impacto de alterações climáticas na zona costeira da Euro Região Norte de Portugal e Galiza. Este estudo foi parcialmente apoiado pelo fundo estratégico UID/Multi/04423/2019 através de fundos nacionais da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia e o Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (ERDF), no âmbito do programa PT2020.

## REFERÊNCIAS

- Bertin, X., Prouteau, E., Letetrel, C., 2013. A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century. *Global and Planetary Change* 106, 77-83.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. and Vitart, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553–597. doi: 10.1002/qj.828
- Deltares, 2018. Delft3D. <http://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals> Acedido em Maio de 2019.
- Dodet G., Bertin, X., Taborda, R., 2010. Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modelling*, 31, 120-131.
- Egbert, G. D., and Svetlana Y. E., 2002. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19.2: 183-204.
- GEBCO, 2018. General Bathymetric Chart of the Oceans. <http://www.gebco.net/> Acedido em Maio de 2019.
- Gomes, A., Pinho, J., Granja, H., 2018. Morphodynamic modelling of a gravel beach at the NW Portuguese coast. IX Simpósio MIA 2018. 4-7 Setembro 2018, Coimbra, Portugal.
- IPCC, 2014. Annex II: Glossary. In: *Climate Change 2014, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1757-1776.
- Jongedijk, C., 2017. Improving XBeach non-hydrostatic model predictions of the swash morphodynamics of intermediate-reflective beaches. Master Thesis. TU Delft. Netherlands.

- Nikishova, A., Kalyuzhnaya, A., Boukhanovsky, A., & Hoekstra, A., 2017. Uncertainty quantification and sensitivity analysis applied to the wind wave model SWAN. *Environmental modelling & software*, 95, 344-357.
- Observatório Raia, 2019. Observatorio Oceanográfico da Marxe Ibérica. <http://www.marnaraia.org> Acedido em Maio de 2019.
- Pinho, J., 2017. Monitorizar a morfodinâmica para conhecer bem e gerir melhor a zona costeira. In *Seminário - Inovação e Gestão Colaborativa para a Sustentabilidade das Zonas Costeiras*, Braga, 9 De Junho de 2015, ISBN:978-989-20-7316-3, 29-32, Universidade do Minho.
- Pranzini, E., A. Williams (eds.). 2013. *Coastal erosion and protection in Europe*. Routledge, Oxon, 457 pp.
- Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A. P., de Vries, J. V. T., McCall, R. e Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal engineering*, 56(11), 1133-1152
- Santos, L., Gomes, M., Vieira, L., Pinho, J. and Antunes do Carmo, J., 2018. Storm surge assessment methodology based on numerical modelling. In *13th International Conference on Hydroinformatics - HIC 2018*, Vol. 3, pp. 1876-1884. EasyChair.
- SWAN, 2018. Delft University of Technology. <http://www.tudelft.nl/en/ceg/about-faculty/departments/hydraulic-engineering/sections/environmental-fluid-mechanics/research/swan/> Acedido em Maio de 2019.
- Tolman, H., 2002. "User Manual and system documentation of WAVEWATCH-III" – version 2.22, N.O.A.A., National Centers for Environmental Prediction, OMB Technical Note 222, Camp Springs, MD, U.S.A.
- Vousdoukas, M. , Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., & Feyen, L., 2017. Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future*, 5(3), 304-323.