



**NUMERICAL MODELS' APPLICATION FOR MORPHODYNAMICS ASSESSMENT OF CLIMATE CHANGE IMPACTS IN THE MINHO RIVER ESTUARY**  
**APLICAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA ANALISAR OS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA MORFODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO RIO MINHO**

William Melo<sup>1\*</sup>; José Pinho<sup>1</sup>; Isabel Iglesias<sup>2</sup>; Ana Bio<sup>2</sup>; Paulo Avilez-Valente<sup>2,3</sup>; Ana Gomes<sup>1</sup>; José Vieira<sup>1</sup>; Luísa Bastos<sup>2,4</sup>; Fernando Veloso-Gomes<sup>2,3</sup>

## Abstract

The knowledge of physical, biological, and chemical estuarine processes and how they are affected by climate change conditions is essential for improving estuarine management. A common methodological approach for studying these complex processes is based on the implementation of numerical models supported by field data as bathymetry, sediment characteristics, flow discharges, current velocities, and sea water levels. This work is based on the implementation of a numerical model of the Minho River estuary using the Delft3D software. This model is able to simulate hydrodynamic and morphodynamic processes for different time scales. It was calibrated using the OpenDA tool, which automatically determines some of the models' parameters, such as the tidal constituents and the roughness coefficient, aiming to minimize the error between observed data and simulated results. Different scenarios were considered to assess the effects of climate change, according to the 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Results showed that the elevation in the estuary mouth can reach 77 cm, depending on the considered scenario. It was also determined that floods are the main sediment transport driver along the estuary, intensifying the accretion processes. Furthermore, the sea-level rise reduces the amount of transported sediments to the coastal platform, increasing the erosion risk in this area and increasing the accretion inside the estuary.

**Keywords:** Morphodynamics. Numerical modelling. Climate changes.

## Resumo

Conhecer os processos físicos, químicos e biológicos estuarinos e entender como as mudanças climáticas podem afetá-los é crucial para melhorar a gestão destes sistemas. Uma das metodologias utilizadas para estudar estes processos complexos consiste na aplicação de modelos numéricos, suportados por dados de campo como a batimetria, características dos sedimentos, caudais fluviais, correntes e níveis de elevação do mar. Neste trabalho avaliaram-se diferentes cenários hidrodinâmicos e morfodinâmicos no estuário do rio Minho, através da implementação de um modelo numérico baseado no software Delft3D. Este modelo permite simular os processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos em diferentes escalas temporais, tendo sido calibrado utilizando a ferramenta OpenDA, que ajusta de forma automática os valores de determinados parâmetros do modelo, minimizando os erros entre dados observados e resultados simulados. Após a calibração, foram simulados diferentes cenários para avaliar o impacto das alterações climáticas, sendo estes estabelecidos através de diferentes elevações do nível do mar conforme o 5º Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

<sup>1</sup>Centro do Território e do Ambiente Construído (CTAC), Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Campus de Azurém 4800-058 Guimarães, Portugal.

\*Corresponding author: [uid9257@alunos.uminho.pt](mailto:uid9257@alunos.uminho.pt)

<sup>2</sup>Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR/CIMAR) Universidade do Porto, Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões, Av. General Norton de Matos s/n, 4450-208 Matosinhos, Portugal.

<sup>3</sup>Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal.

<sup>4</sup>Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP), Rua Campo Alegre 687, 4169-007 Porto, Portugal.

Os resultados mostraram que a elevação do nível na embocadura do estuário pode alcançar até 77 cm, dependendo do cenário considerado. Identificou-se que a ocorrência de cheias é o principal responsável pelo transporte de sedimentos ao longo do estuário, intensificando o processo de sedimentação. Verificou-se ainda que, para um mesmo caudal, o aumento do nível do mar reduz a quantidade de sedimentos transportada para a plataforma costeira, podendo intensificar a erosão que ocorre nesta zona e aumentar os processos sedimentares dentro do próprio estuário.

**Palavras-chave:** Morfodinâmica. Modelação numérica. Mudanças climáticas.

Submitted on: 15 Oct. 2021

Accepted on: 16 Nov. 2021

Published on: 31 Dec. 2021



# 1 Introdução

Estuários e zonas costeiras são ecossistemas ricos em recursos naturais e de elevada biodiversidade, fornecendo serviços essenciais para as populações que ocupam estas áreas. Estas zonas possuem elevada importância em atividades socioeconómicas como pesca, agricultura e turismo, e ainda concentram algumas das maiores cidades do planeta (BARBIER et al., 2011; LUIJENDIJK et al., 2018; SMALL; NICHOLLS, 2003). Apesar disso, estes ecossistemas estão entre os mais ameaçados pelos efeitos das alterações climáticas devido ao aumento do nível médio do mar e o aumento da frequência de eventos extremos, como cheias, tempestades ou secas (MASSON-DELMOTTE et al., 2021; STANSBY, 2013). A avaliação e mitigação dos potenciais impactos das alterações climáticas em estuários requer um conhecimento abrangente do sistema e da sua morfodinâmica. Para além disso, é importante reforçar que um conhecimento pormenorizado da evolução da morfologia de um estuário é extremamente importante para o planeamento do uso e ocupação do terreno, bem como a gestão dos seus recursos naturais.

Este trabalho centrou-se no estuário do rio Minho. Trabalhos anteriores demonstraram a importância deste rio no fornecimento de nutrientes a ecossistemas aquáticos próximos (DES et al., 2019; MENDES et al., 2016) e estudaram os efeitos das mudanças climáticas na hidrodinâmica da região (IGLESIAS et al., 2019b). Contudo, ainda são raros os trabalhos cujo foco seja a morfodinâmica deste sistema, que tem vindo a sofrer nos últimos anos, um assoreamento dominante (PORTELA, 2011).

Neste contexto, este trabalho simulou diferentes cenários morfodinâmicos no estuário do rio Minho considerando diferentes elevações do nível do mar, de forma a integrar os cenários definidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014). Para isso, foi criado um modelo numérico do estuário do rio Minho baseado no software Delft3D. Este modelo foi calibrado utilizando a ferramenta OpenDA, que determina os valores de parâmetros do modelo de forma automática, procurando reduzir a diferença entre os resultados das simulações e os dados observados in situ.

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Estuário do rio Minho

O rio Minho é um rio internacional cuja nascente se localiza na Serra de Meira, em Espanha, percorre cerca de 340 km até desaguar no Oceano Atlântico entre as cidades de A Guarda (Espanha) e Caminha (Portugal). A área da bacia

hidrográfica do rio é de 17080 km<sup>2</sup> e o caudal médio anual é de 400 m<sup>3</sup>/s (MENDES et al., 2016; RIO-BARJA; RODRÍGUEZ-LESTEGÁS, 1996).

Do ponto de vista geológico, o estuário do rio Minho (Figura 1) pode ser dividido a partir do cisalhamento Vigo-Régua, sendo que a oeste afloram terrenos intensamente metamorfizados por granitos e a leste afloram maciços granitóides ultrametamórficos (APA, 2001). O rio Minho é a principal fonte de água doce para os ecossistemas localizados a norte da embocadura do estuário, como a Ria de Vigo e a ria de Pontevedra (SOUSA et al., 2014).

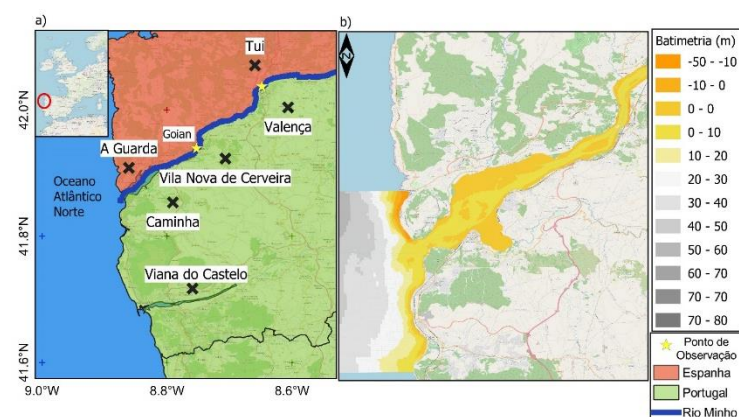


Figura 1: Estuário do rio Minho. a) Localização b) Batimetria.

### 2.2 Modelo numérico

O modelo numérico do estuário do rio Minho foi criado utilizando o software Delft3D. A grelha numérica possui duas fronteiras abertas, sendo uma localizada na estação hidrométrica da Agência Portuguesa do Ambiente em Foz do Mouro e a outra no Oceano Atlântico. A geometria da grelha é curvilínea e a batimetria utilizada, com resolução de 2 m, foi medida em 2011 através de tecnologia LiDAR, tendo sido disponibilizada pela Direção-Geral do Território. Esta batimetria foi complementada com outros levantamentos localizados realizados no estuário.

A calibração do modelo foi realizada com auxílio do software OpenDA (GARCIA et al., 2015; THE OPENDA ASSOCIATION, 2016), que ajusta os valores dos parâmetros do modelo automaticamente, de forma a minimizar o erro entre resultados numéricos e dados observados em campo. O funcionamento desta ferramenta consiste em ciclos de simulação e determinação do erro do modelo. Em cada iteração, os valores dos parâmetros a serem calibrados são variados até o algoritmo encontrar a combinação de valores que resulta no menor erro possível. Neste trabalho, foram calibrados os constituintes harmónicos da maré M2 e S2 e o coeficiente de rugosidade de Manning, sendo que este último foi dividido em duas regiões (rio e oceano). Para a calibração utilizaram-se dados dos níveis de elevação em duas estações de observação localizadas em Tui e em Goian (Figura 1).

## 2.3 Cenários de simulação

Foram definidos dois conjuntos de cenários de simulação, o primeiro com o intuito de avaliar o impacto das alterações climáticas na hidrodinâmica e o segundo para avaliar a influência das alterações climáticas nas condições de transporte de sedimentos. Para isso foi necessário definir os valores de caudal e elevação que seriam impostos nas fronteiras do modelo, considerando diferentes períodos de retorno (PR).

Os valores de caudal foram definidos a partir da Lei de Gumbel (HIRABAYASHI et al., 2013; TUCCI, 1993), utilizando os caudais máximos anuais observados entre 1977 e 2008 na estação de monitorização localizada em Foz do Mouro, fronteira fluvial do modelo. Os valores de elevação do oceano foram definidos utilizando os resultados de Vousdoukas et al. (2017). Cada um dos cenários de alterações climáticas definidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) denominados RCPs (Representative Concentration Pathway), considera uma determinada concentração de gases de efeito estufa na atmosfera num determinado horizonte temporal. Para cada um destes cenários é prevista uma elevação do nível médio do mar. Vousdoukas et al. (2017), utilizando uma serie de modelos numéricos, regionalizou os resultados determinando os níveis de elevação para todas as áreas costeiras europeias com uma resolução de 0.25°. As simulações destes autores consideraram os RCPs 4.5 e 8.5 nos horizontes temporais de 2050 e de 2100. É importante referir que os níveis de elevação obtidos por Vousdoukas et al. (2017) incluem elevações que resultam de diferentes fenómenos para além da elevação do nível médio do mar, como a sobre-elevação de tempestade, as marés e a agitação marinha. Deste modo, os níveis extremos considerados no trabalho de Vousdoukas et al. (2017) serão indicativos do nível mais alto atingido para cada localização considerada. Para este estudo, os níveis de elevação foram extraídos para uma localização próxima da embocadura do estuário do rio Minho. Nas Tabela 1 e 2 apresentam-se os valores utilizados nas fronteiras abertas do modelo para cada um dos cenários considerados.

No cenário M01, deve-se destacar que foi utilizado um caudal referente ao percentil 85 de acordo com os dados observados disponíveis na estação de monitorização de Foz do Mouro. Este valor foi atribuído porque o caudal médio observado no rio não é o suficiente para transportar sedimentos em quantidades significativas. Visto que o transporte de sedimentos é proporcional à tensão tangencial na interface água-solo e que esta, por sua vez, é maior quanto maior for o caudal, o uso de um caudal médio como condição de fronteira implicaria em pouco ou até nenhum transporte de sedimentos (KANDOLF; PIÉGAY, 2003). Assim, optou-se por usar o valor de 541 m<sup>3</sup>/s de forma a simular situações favoráveis ao transporte de

sedimentos. O diâmetro médio (D50) utilizado foi de 0.059 mm (BALSINHA et al., 2009).

**Tabela 1:** Condições de fronteira para simulações hidrodinâmicas.

Cenário	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Período de retorno (anos)	Cenário Climático	Elevação do oceano (m)
S1_50	5365		Histórico	3.9
S2_50	5365		RCP 4.5 2050	4.1
S3_50	5365	50	RCP 4.5 2100	4.4
S4_50	5365		RCP 8.5 2050	4.2
S5_50	5365		RCP 8.5 2100	4.7
S1_100	6038		Histórico	4.0
S2_100	6038		RCP 4.5 2050	4.2
S3_100	6038	100	RCP 4.5 2100	4.5
S4_100	6038		RCP 8.5 2050	4.2
S5_100	6038		RCP 8.5 2100	4.8

**Tabela 2:** Condições de fronteira para simulações morfodinâmicas.

## 3 Resultados

### Calibração do modelo

Os valores finais dos parâmetros do modelo, após a etapa de calibração realizada pelo OpenDA, são apresentados na Tabela 3. Destaca-se que houve uma diferença de 0.007 no valor do coeficiente de Manning entre as duas regiões em que foi dividido o domínio. Isso mostra que, para alcançar resultados com menor erro e melhorar a eficiência do modelo, dividir o domínio em diferentes regiões associadas a distintos valores de rugosidade do fundo poderá ser uma estratégia adequada. Além disso, o OpenDA determina o valor eficaz, o viés e o desvio padrão em cada ponto de observação (Tabela 4).

**Tabela 3:** Valores dos parâmetros calibrados.

Parâmetro	M2 amplitude (m)	M2 ângulo de fase (graus)	S2 amplitude (m)	S2 ângulo de fase (graus)	Coefficiente de Manning no trecho fluvial	Coefficiente de Manning no oceano
Valor	0.557	73.953	0.169	118.549	0.019	0.026

Tabela 1: Resultados da calibração do modelo.

Ponto de observação	Valor eficaz	Valor eficaz médio	Viés	Viés médio	Desvio padrão (m)	Desvio padrão médio (m)
Tui	0.3385	-	-	-	0.3085	-
Goian	0.2007	0.2696	0.1401	-	0.1955	0.2520
			0.0462	0.0932		

A análise destes resultados demonstra que o modelo simula melhor os valores de níveis na região a jusante do estuário (Goian) do que a montante (Tui). Isso relaciona-se com a proximidade de Tui à fronteira fluvial do modelo, a qual pode ser uma fonte de incerteza do modelo, podendo resultar num maior erro neste local. O valor do viés indica que o modelo tende a subestimar os valores dos níveis de elevação quando comparados com os valores observados.

### Cenários hidrodinâmicos

A Figura 2 apresenta o resultado da elevação da superfície livre ao longo de um perfil do estuário, entre Goian e a embocadura do rio, correspondendo a um desenvolvimento de 14 km, aproximadamente. A diferença na elevação obtida na embocadura do estuário entre cenários com caudais de diferentes PR (S1\_50 e S1\_100) é de cerca de 10 cm. Para as condições de fronteira que consideraram a elevação do RCP 8.5 em 2100, refletidas nos cenários S5\_50 e S5\_100, a diferença na elevação foi de 11cm. Nas localizações de montante, a diferença na elevação pode chegar até aos 38 cm.

Ao comparar cenários com o mesmo caudal, verifica-se que quanto maior a elevação do nível do mar, maior o nível de água nas regiões próximas da embocadura. Tanto para os cenários com PR de 50 anos S1\_50 e S5\_50, como para os cenários com PR de 100 anos S1\_100 e S5\_100, a maior diferença de elevação entre cenários é de 77 cm. Assim, o nível do mar apresenta uma grande influência nas regiões próximas da embocadura, mas o caudal é dominante a montante no estuário. Esta afirmação evidencia-se ao analisar o perfil do cenário S5\_50, cuja elevação é superada por todos os cenários com período de retorno de 100 anos nas áreas mais elevadas do estuário, com exceção do cenário S1\_100. A diferença na elevação entre os cenários S1\_100 e S5\_50 foi de 4 cm à montante do estuário. Ainda, até o quilómetro 9, este cenário resultou em níveis mais elevados do que todos os restantes cenários, com exceção do S5\_100, cuja diferença da elevação na embocadura foi de 11 cm.

Em relação ao impacto do aumento do nível do mar nos diferentes cenários, verifica-se que, nos cenários de caudal associados a um PR de 50 anos, o aumento da elevação é maior nas áreas próximas da embocadura, enquanto nos cenários de caudal mais intenso, a elevação do nível do mar resultou em maiores níveis em locais a montante no

estuário. Este facto deve-se provavelmente à redução da velocidade de escoamento ocasionada pela elevação do nível do mar, mas também pelo alargamento do estuário junto da embocadura. Para um mesmo caudal, quanto maior a elevação do nível do mar, menor é a energia disponível entre um ponto a montante do estuário e o mar, resultando em menores velocidades de corrente, e consequentemente maior tempo necessário para a propagação de uma cheia.

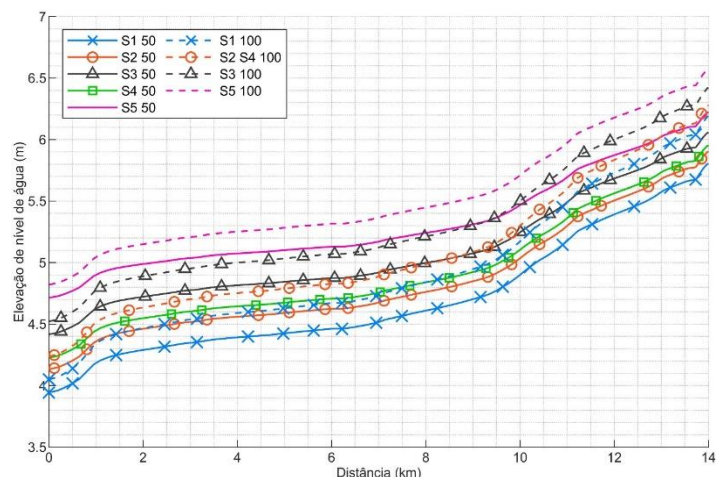


Figura 2: Resultados de elevação da superfície livre

### Cenários morfodinâmicos

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos para as simulações morfodinâmicas. Uma vez que os parâmetros relacionados com a morfodinâmica do modelo não foram calibrados devido à ausência de dados que pudessem dar suporte a este procedimento, optou-se por analisar estes resultados de forma qualitativa. Recorreu-se a um sistema de informação geográfica para processar os dados do modelo e quantificar as áreas onde houve erosão ou sedimentação. Foram contabilizadas as células cuja cota de fundo variou mais que 1 mm. É possível observar que o cenário M01 apresenta um transporte sedimentar reduzido. Isso deve-se provavelmente ao menor caudal considerado, o que resulta em tensões tangenciais no fundo insuficientes para transportar os sedimentos. Os restantes cenários permitem concluir que as cheias possuem uma importante função no transporte de sedimentos ao longo do estuário. Em todos os cenários foi possível um acréscimo no transporte em relação ao cenário M01.

A Figura 3b apresenta a percentagem de células do modelo onde houve erosão ou sedimentação, de forma a facilitar a análise dos resultados. Verifica-se uma tendência de acumulação de sedimentos em todos os cenários, o que mostra que a forma do estuário ainda não alcançou uma configuração de equilíbrio nas simulações realizadas.

Ao comparar cenários com o mesmo caudal, é possível verificar que quanto maior a elevação do nível do mar, menor o transporte de sedimentos, sendo que o cenário que

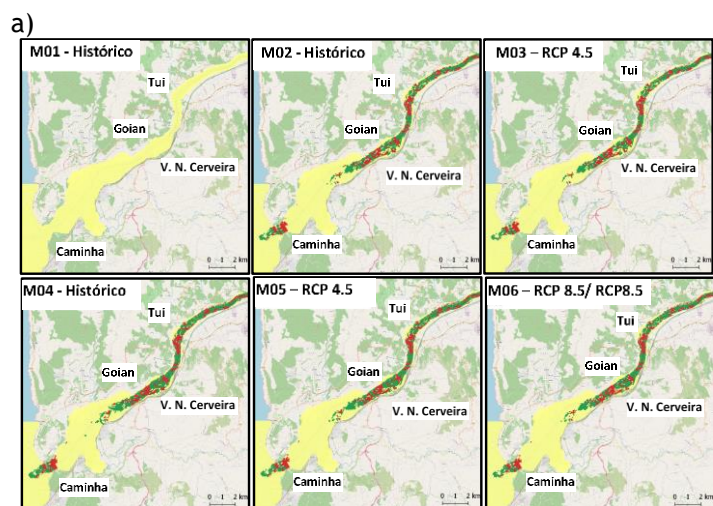
resultou em maior transporte (M04) possuía o menor nível do mar e o maior caudal. Isso permite concluir que o caudal e, conseqüentemente, a velocidade da corrente, é um fator importante no transporte de sedimentos no estuário do rio Minho.

## 4 Discussão

Após a análise dos resultados apresentados neste trabalho, evidencia-se a importância de métodos de calibração automáticos que possibilitam a criação de modelos numéricos mais eficientes, facilitando a tarefa de calibração. A etapa de calibração do modelo, que é essencial para garantir que os resultados de simulações sejam próximos dos valores observados, requer tempo e recursos computacionais que normalmente são limitados, principalmente se tais modelos apresentarem uma elevada resolução espacial. Ao automatizar esta tarefa com ferramentas como o OpenDA, além de reduzir possíveis erros durante a comparação dos resultados, torna-se possível calibrar vários parâmetros simultaneamente, otimizando os recursos durante esta etapa e alcançando modelos ligeiramente mais complexos e confiáveis.

Em relação aos resultados das simulações hidrodinâmicas, evidencia-se que as mudanças climáticas devem aumentar a ocorrência de cheias na região. O estuário do rio Minho é dominado pelo nível do mar, mesmo durante a ocorrência de cheias (IGLESIAS et al., 2019a). Isso deve-se provavelmente à configuração do estuário e respetiva batimetria, que permite a propagação dos níveis do mar ao longo de todo o estuário. Por outro lado, o estuário desenvolve-se ao longo de um vale relativamente plano, que permite o escoamento de cheias com elevações moderadas da superfície livre.

No que se refere aos resultados morfodinâmicos, foi possível constatar a tendência de assoreamento no estuário, também identificada no plano da bacia hidrográfica do rio Minho (APA, 2001). No entanto, ressalta-se a limitação deste modelo, uma vez que não foi possível calibrar os parâmetros relacionados com a morfodinâmica, como a concentração de sedimentos nas fronteiras, por exemplo. Apesar disso, estes resultados podem servir de alerta para a importância deste tipo de informação em futuros estudos, que permitam quantificar e identificar as zonas mais críticas de acumulação e erosão ao longo do estuário.



Erosão/ Deposição acumulada  
 Erosão 0 Deposição

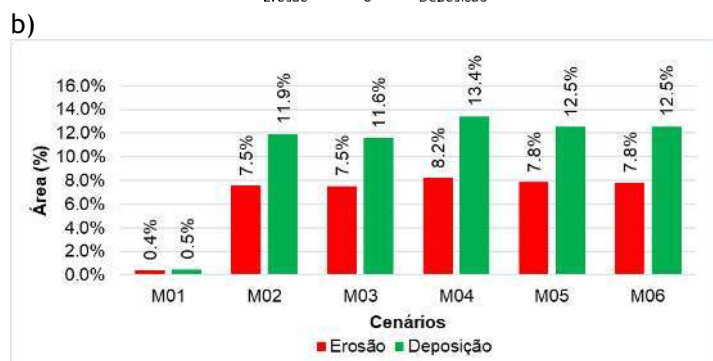


Figura 3: Resultados das simulações morfodinâmicas. a) Resultados ao longo do estuário. b) Ocorrência de erosão e deposição em cada cenário.

## 5 Agradecimentos

Esta publicação foi apoiada por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia, no âmbito dos projetos estratégicos UIDB/04423/2020 e UIDP/04423/2020, e pelo projeto EsCo-Ensembles (PTDC/ECI-EGC/30877/2017), cofinanciado pelo NORTE2020, pelo Portugal 2020 e pela União Europeia através do FEDER, e pela FCT através de fundos nacionais. Willian Melo agradece o financiamento da bolsa de doutoramento do programa MIT-Portugal (SFRH/BD/151383/2021) cofinanciada pela FCT. Os autores agradecem ao Instituto Hidrográfico, à Agência Portuguesa do Ambiente, à Direção Geral do Território e à Confederação Hidrográfica Miño-Sil pelos dados fornecidos que foram utilizados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

APA, A. P. DO A. Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Minho. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www.apambiente.pt/\\_zdata/Políticas/Agua/PlaneamentoGestao/PBH2001/Douro\\_RelatorioFinal.pdf](http://www.apambiente.pt/_zdata/Políticas/Agua/PlaneamentoGestao/PBH2001/Douro_RelatorioFinal.pdf)>.

BALSINHA, M. J. et al. Textural composition of sediments from Minho and Douro estuaries (Portugal) and its relation with hydrodynamics. *Journal of Coastal Research*, n. SPEC. ISSUE 56, p. 1330-1334, 2009.

- BARBIER, E. B. et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, v. 81, n. 2, p. 169-193, maio 2011.
- DES, M. et al. Hydrodynamics of river plume intrusion into an adjacent estuary: The Minho River and Ria de Vigo. *Journal of Marine Systems*, v. 189, n. May 2018, p. 87-97, 1 jan. 2019.
- GARCIA, M. et al. Application of a three-dimensional hydrodynamic model for San Quintin Bay, B.C., Mexico. Validation and calibration using OpenDA. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v. 273, p. 428-437, 1 jan. 2015.
- HIRABAYASHI, Y. et al. Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, v. 3, n. 9, p. 816-821, 2013.
- IGLESIAS, I. et al. Two Models Solutions for the Douro Estuary: Flood Risk Assessment and Breakwater Effects. *Estuaries and Coasts*, v. 42, n. 2, p. 348-364, 13 mar. 2019a.
- IGLESIAS, I. et al. Modelling the Main Hydrodynamic Patterns in Shallow Water Estuaries: The Minho Case Water, v. 11, n. 5, p. 1040, 18 maio 2019b.
- IPCC. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [s.l: s.n.].
- KANDOLF, G. M.; PIÉGAY, H. Tools in Fluvial Geomorphology. Second ed. [s.l.] Wiley Blackwell, 2003.
- LUIJENDIJK, A. et al. The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 1-11, 2018.
- MASSON-DELMOTTE, V. et al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf)>.
- MENDES, R. et al. New insights into the Western Iberian Buoyant Plume: Interaction between the Douro and Minho River plumes under winter conditions. *Progress in Oceanography*, v. 141, p. 30-43, fev. 2016.
- PORTELA, L. I. Evolução Morfológica, Hidrodinâmica e Dinâmica Sedimentar do Estuário do rio Minho. Seminário sobre Gestão de Bacias Hidrográficas "Os Estuários, 2011.
- RIO-BARJA, F. X.; RODRÍGUEZ-LESTEGÁS, F. Os ríos, in *as augas de Galicia*. Consello de Cultura, p. 178-180, 1996.
- SMALL, C.; NICHOLLS, R.J. A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, v.19, n.3, p. 584-599, 2003.
- SOUSA, M. C. et al. Influence of the Minho River plume on the Rias Baixas (NW of the Iberian Peninsula). *Journal of Marine Systems*, v. 139, p. 248-260, 1 nov. 2014.
- STANSBY, P. K. Coastal hydrodynamics - present and future. *Journal of Hydraulic Research*, v. 51, n. 4, p. 341-350, 2 ago. 2013.
- THE OPENDA ASSOCIATION. OpenDA User Documentation. Disponível em: <[https://www.openda.org/docu/openda\\_2.4/doc/OpenDA\\_documentation.pdf](https://www.openda.org/docu/openda_2.4/doc/OpenDA_documentation.pdf)>. Acesso em: 16 jan. 2020.
- TUCCI, C. E. M. Hidrologia Ciência e Aplicação. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1993.
- VOUSDOUKAS, M. I. et al. Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future*, v. 5, n. 3, p. 304-323, mar. 2017.