

Melhoria do desempenho de modelos hidrodinâmicos estuarinos para previsão de níveis da água utilizando técnicas de *ensembles*

I. Iglesias (1), J. L. Pinho (2), W. Melo (2), P. Avilez-Valente (1,3), A. Bio (1), M. Cruz (4), J. Vieira (2), L. Bastos (1,5), F. Veloso-Gomes (1,3)

- (1) Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR/CIMAR), Universidade do Porto, Portugal. iiglesias@ciimar.up.pt.
- (2) Centro de Território, Ambiente e Construção (CTAC), Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- (3) Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal.
- (4) Faculdade de Ciências, Universidade do Minho, Braga, Portugal
- (5) Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território (DGAOT), Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Portugal.

Resumo: Os modelos numéricos são ferramentas essenciais para caracterizar os padrões hidrodinâmicos complexos de sistemas estuarinos. No entanto, os seus resultados apresentam incertezas que resultam das aproximações das formulações, dos métodos numéricos, dos valores adotados para as ações forçadoras, dos dados da geometria do domínio e de parâmetros de calibração. A técnica de *ensembles* permite diminuir essa incerteza, melhorando as previsões da hidrodinâmica estuarina. Esta técnica foi aplicada em dois estuários portugueses, Douro e Minho, considerando diferentes cenários (verão, inverno, evento extremo). Verificou-se que as técnicas de *ensembles* que consideram médias ponderadas, com pesos decorrentes do desempenho individual de cada um dos modelos, permitem obter resultados mais aproximados aos valores observados. Verifica-se ainda que os resultados melhoram com o aumento do número de membros do ensemble. Esta técnica será utilizada para simular eventos extremos em climas futuros, e verificar se existe uma resposta diferenciada no comportamento da hidrodinâmica dos estuários estudados.

Palavras-chave: estuários, *ensembles*, eventos extremos, hidrodinâmica, modelos numéricos.

1. INTRODUÇÃO

Os estuários são sistemas dinâmicos, sujeitos à influência de fenómenos meteorológicos, oceanográficos e geomorfológicos, com fortes variações de salinidade, correntes, temperatura e qualidade da água. Possuindo ecossistemas altamente produtivos e sendo geralmente as respetivas margens densamente povoadas e altamente urbanizados, os estuários revestem-se de uma importância ambiental, económica e social estratégica. Mas essas características aumentam a sua vulnerabilidade aos efeitos de eventos extremos, alterações climáticas e intervenções antrópicas.

Há uma necessidade urgente de informações científicas precisas para apoiar uma gestão costeira sustentável, reduzir a exposição e vulnerabilidade, mitigar os riscos e promover a adaptação e resiliência das comunidades costeiras. Os modelos numéricos são uma ferramenta fundamental, pois permitem uma compreensão detalhada dos processos que ocorrem nestas áreas. No entanto, cada modelo apresenta vantagens e desvantagens intrínsecas e os seus resultados, incertezas e eventuais erros dependem de muitos fatores distintos. É necessário encontrar e implementar novas soluções que

permitam obter resultados mais precisos, sendo uma das técnicas adequada à melhoria das previsões numéricas a técnica de *ensembles*.

Um *ensemble* combina várias simulações de modelos numéricos usando métodos estatísticos. Os resultados obtidos são sintetizados num único resultado que apresenta menores viés e variância relativamente a soluções individuais, melhorando assim a precisão, fiabilidade e consistência da previsão final (Iglesias et al. 2022). É uma técnica comum na simulação de processos atmosféricos e climáticos, aplicada para melhorar as previsões meteorológicas, sazonais, interanuais e de alterações climáticas (WMO, 2012). Contudo, na modelação da hidrodinâmica estuarina, esta técnica ainda não foi amplamente aplicada, sendo raros os trabalhos realizados nesta área (Mohan Das et al., 2017; Iglesias et al., 2019a; Iglesias et al., 2022).

Podemos distinguir duas classes principais de *ensembles*: i) aqueles que usam os resultados de um único modelo e ii) os que são calculados com resultados oriundos de distintos modelos. Um *superensemble* é um *ensemble* multimodelo que usa várias condições iniciais para cada um dos modelos considerados (Iglesias et al., 2019a, Iglesias et al., 2022).

Neste trabalho apresentam-se resultados da aplicação da técnica de ensembles em dois estuários, utilizando-se *superensembles*.

2. ÁREAS DE ESTUDO

Os estuários modelados foram os dos rios Minho e Douro (Fig. 1), pois apresentam dinâmicas e condições ambientais muito diferentes, para além de diferenças nos caudais, morfologia, batimetria, configuração de margens e nível de urbanização.

O Minho desagua no oceano Atlântico entre A Guarda (Espanha) e Caminha (Portugal). O seu estuário é pouco profundo (Fig. 1), com uma extensão de 40 km. A entrada fluvial é controlada pela barragem de Friera, localizada 80 km a montante da foz. A sua dinâmica é influenciada pela maré, com efeito direto no transporte de sedimentos. A parte inferior apresenta um alargamento que se traduz numa diminuição da velocidade da corrente, criando condições favoráveis à deposição de sedimentos, e causando restrições à navegação e aparecimento de ilhas e bancos de areia durante a maré baixa. Isso é mais perceptível em marés baixas de marés vivas, quando a ligação entre o estuário e o mar se restringe a dois canais rasos (Iglesias et al., 2019b).

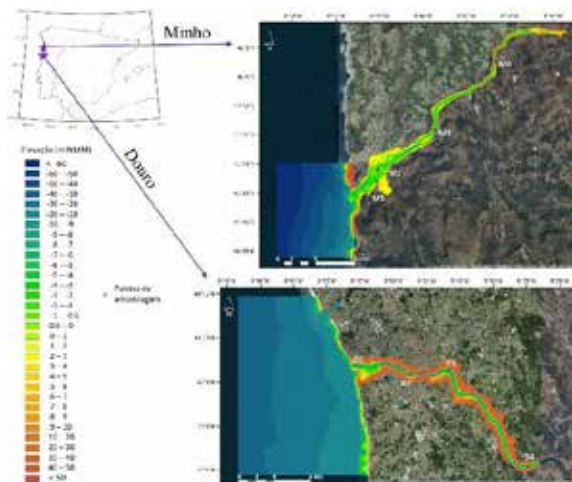


Fig. 1. Localização e topobatemetria dos estuários do Minho e do Douro.

O Douro desagua no oceano Atlântico através de um estuário urbano, estreito e altamente dinâmico, com regimes torrenciais que produzem fortes correntes e inundações recorrentes. A configuração batimétrica é irregular, com profundidades entre 0 e 10 m e fundões de até 28 m (Fig. 1). A dinâmica estuarina é condicionada pelo caudal e altamente dependente da operação da barragem de Crestuma-Lever, que limita a extensão do estuário a 21 km. Na margem sul, na foz existe uma restinga que obstrui parcialmente a entrada e protege o estuário (Bastos, et al., 2012). Para estabilizá-la, foram realizadas intervenções com um quebra-mar, que interfere nos padrões hidro-morfodinâmicos, causando um aumento persistente e significativo da área e do

volume da restinga num período relativamente curto (10 anos). A sua configuração atual reduz a probabilidade de ruptura durante eventos extremos, sendo esperados efeitos mais severos durante as cheias (Bastos et al., 2012, Iglesias et al., 2019a).

3. METODOLOGIA

Os modelos numéricos foram implementados com os programas openTELEMAC-MASCARET (OTM) e Delft3D (D3D) e foram calibrados para os dois estuários considerando condições normais e eventos extremos (Iglesias et al., 2019a, 2019b, 2021; Melo et al., 2020; Melo et al., 2022).

Os modelos simularam condições históricas, permitindo calibrar o *superensemble* com medições *in situ* da elevação da superfície livre em vários pontos (M1 a M4 para o Minho e D1 a D4 para o Douro, Fig. 1). A validação do *superensemble* considerando outros valores de elevação estatisticamente independentes destes não se conseguiu realizar devido à falta de dados. Consideraram-se três cenários com diferentes caudais: verão, inverno e evento extremo, ocorridos durante o ano de 2006 (Tab. i). As simulações realizadas consideraram um período de 24 h com condições de elevação e caudal constantes, precedidos por um período de *spin-up*, onde os modelos são forçados nas fronteiras com valores crescentes de caudais para evitar instabilidades numéricas.

		Data	Caudal (m ³ /s)	Desvio padrão (m ³ /s)
Minho	Verão	25/08/2006	42	61
	Inverno	23/02/2006	495	528
	Evento extremo	08/12/2006	2476	-
Douro	Verão	17/08/2006	49	201
	Inverno	19/12/2006	1205	979
	Evento extremo	25/11/2006	7795	-

Tab. i. Caudal considerado para cada simulação e desvio padrão do mês simulado.

Efetuarão-se simulações que combinaram diferentes valores de caudal e elevação, sendo o caudal incluído como: (a) valor registado, (b) valor registado acrescido do valor do desvio padrão do mês simulado e (c) valor registado diminuído do valor do desvio padrão do mês simulado (Tab. i). Os desvios padrão foram calculados utilizando os caudais médios diários medidos em Foz do Mouro (1973–2020), para o estuário do Minho, e os caudais médios horários em Crestuma Lever (1998–2020), para o estuário do Douro. Introduziram-se vários valores de elevação no limite oceânico considerando as características da maré durante o ano,

nomeadamente: (a) níveis máximos e (b) mínimos de maré registados no dia da simulação, bem como (c) a maré anual mais alta, (d) a maré viva mais alta, (e) a maré morta mais alta, (f) a maré anual mais baixa, (g) a maré viva mais baixa e (h) a maré morta mais baixa (Tab. ii). Para o evento extremo foi incluída uma elevação adicional de 1,10 m que poderá ser, entre outros, associada à sobrelevação meteorológica.

Níveis considerados	Minho	Douro
	Elevação (m)	Elevação (m)
Máximo verão	1,39	0,78
Mínimo verão	-1,30	-0,76
Máximo inverno	0,79	1,06
Mínimo inverno	-0,64	-1,05
Máximo evento extremo	1,32	1,20
Mínimo evento extremo	-1,18	-1,07
Maré anual mais alta	1,84	1,86
Maré viva mais alta	1,47	1,48
Maré morta mais alta	0,66	0,66
Maré anual mais baixa	-1,8	-1,79
Maré viva mais baixa	-1,47	-1,48
Maré morta mais baixa	-0,67	-0,65

Tab. ii. Níveis de elevação considerados na fronteira oceânica.

Os *ensembles* são construídos usando técnicas estatísticas que reúnem os diferentes resultados numa única previsão. Existem muitos métodos estatísticos para o fazer, sendo necessário selecionar aquele que melhor se adapta a cada problema. A técnica mais simples é a de usar a mediana ou a média aritmética dos valores resultantes dos modelos individuais. No entanto, diferentes modelos numéricos possuem diferentes capacidades, e considerar a capacidade preditiva de cada modelo individual pode melhorar a previsão. Isso pode ser realizado através do cálculo de médias ponderadas, atribuindo um peso a cada modelo de acordo com o respetivo desempenho individual. Este peso é calculado comparando os resultados dos modelos individuais com observações *in situ*. Neste caso, o erro absoluto (MP-EA) e o erro quadrático (MP-EQ) foram adotados como coeficientes de ponderação.

Para avaliar os resultados do *ensemble*, estes foram comparados com os valores observados, utilizando-se o erro absoluto (AE) como métrica de desempenho.

4. RESULTADOS

As simulações realizadas mostram que existem variações entre os erros do OTM e os do D3D considerando os distintos cenários, estuários e pontos (Tab. iii). A média do erro mínimo do OTM é de 0,299 m, enquanto que a do D3D é de 0,383 m.

Esta diferença não permanece constante para todos os cenários considerados. Nos cenários de inverno e eventos extremos, o OTM superou o D3D com erros médios mínimos de 0,093 m e 0,145 m para inverno e 0,444 m e 0,649 m para eventos extremos. No entanto, para o cenário de verão, os erros dos dois modelos são semelhantes, com erro médio mínimo de 0,388 m e 0,389 m para OTM e D3D, respetivamente. Se analisarmos os estuários representados, o estuário do Minho apresentou soluções mais precisas, com um erro médio global mínimo de 0,153 m e de 0,191 m, para OTM e D3D, respetivamente. Os erros mínimos médios globais para o Douro foram 0,420 m (OTM) e 0,543 m (D3D).

Estuário	Cenário	Ponto	EA mínimo (m)		Técnica <i>ensemb.</i>	EA <i>ensemb.</i> (m)	
			D3D	OTM			
Minho	Verão	M1	0,492	0,469	MP-EA	0	
		M3	0,291	0,302	MP-EA	0	
		M4	0,303	0,303	MP-EA	0	
	Inverno	M1	0,001	0,004	MP-EC	0,001	
		M2	0,074	0,015	MP-EC	0,009	
		M3	0,082	0,253	MP-EC	0,009	
		M4	0,116	0,053	MP-EC	0,004	
	Evento extremo	M1	0,162	0,081	Media	0,037	
		M3	0,053	0,016	MP-EC	0,002	
		M4	0,334	0,035	MP-EC	0,028	
	Douro	Verão	D1	0,376	0,375	MP-EA	0
			D2	0,431	0,438	MP-EA	0
D3			0,430	0,429	MP-EA	0	
D4			0,402	0,397	Media	0,024	
Inverno		D1	0,505	0,286	MP-EA	0	
		D2	0,123	0,065	MP-EA	0	
		D3	0,249	0,028	MP-EC	0,013	
		D4	0,011	0,040	MP-EC	0,008	
Evento extremo		D1	0,096	0,609	MP-EC	0,012	
		D2	1,679	0,592	MP-EC	1,390	
		D3	2,036	1,737	MP-EC	2,506	
		D4	0,182	0,041	MP-EC	0	

Tab. iii. Erros absolutos (EA) mínimos para cada modelo, cenário e ponto de amostragem, identificação da melhor técnica de construção do *superensemble* e EA do *superensemble*.

Os maiores erros mínimos foram obtidos para o cenário de eventos extremos no ponto D3 (Tab. iii). Os eventos extremos podem ser difíceis de modelar devido à complexidade da sua dinâmica e aos fortes processos erosivos e inundações, que apresentam um comportamento hidrodinâmico diferente no canal principal. Assumiu-se que os dados medidos representam a realidade. No entanto, não se pode descartar que essas grandes diferenças entre os níveis de água medidos e simulados possam estar relacionadas com erros nas campanhas de amostragem ou com imprecisões nos modelos numéricos para esses locais específicos.

Entre as técnicas de construção do *superensemble* que fornecem os melhores resultados para cada

cenário, estuário e ponto de amostragem, destaca-se a técnica que considera médias ponderadas. O MP-EQ revelou-se como a melhor técnica para cenários com elevado caudal (inverno e eventos extremos), enquanto o MP-EA teve melhor desempenho em situações de baixo caudal (verão). Para quase todas as simulações, o *superensemble* obteve erros absolutos inferiores aos obtidos pelos modelos individualmente, demonstrando que os *superensembles* são capazes de melhorar a previsão obtida com modelos hidrodinâmicos aplicados em estuários.

Os resultados dos cenários de verão e inverno foram divididos em dois grupos: um grupo para as 24 simulações que consideraram as condições oceânicas com o nível de água mais elevado e outro para as outras 24 que consideraram o nível mais baixo. Os resultados para cada grupo foram comparados com os níveis de água mais elevados e mais baixos registados nas medições. Para o *superensemble* construído com as 24 simulações de níveis elevados, os erros nos resultados obtidos foram geralmente inferiores a 0,1 m. No entanto, em 5 dos 15 cenários/pontos de amostragem, o *superensemble* não melhorou as previsões dos modelos individuais. Para o *superensemble* construído com os 24 membros para as previsões de níveis mais baixos, a situação é muito parecida, superando o resultado dos modelos individualmente em 7 de 15 simulações. Este resultado é demonstrativo de que o número de membros do *ensemble* é crucial para a melhoria da previsão.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou que a técnica de *ensembles* permite melhorar a previsão de modelos hidrodinâmicos em estuários. Verificou-se para dois estuários distintos (Minho e Douro), em três cenários (verão, inverno e evento extremo) e em distintos pontos de cada estuário. Assim, a técnica de *ensembles* permite diminuir as incertezas associadas a previsões realizadas com base em modelos numéricos, produzindo melhores resultados do que cada um dos modelos individualmente, obtendo-se resultados mais próximos dos valores observados. As técnicas estatísticas de construção de *ensembles* que se mostraram mais eficazes foram baseadas em médias ponderadas. Não foram encontradas diferenças relevantes entre os dois estuários, nem associadas à localização dos pontos de amostragem, mostrando que esta técnica pode ser amplamente aplicada a qualquer estuário. Foi ainda verificado que o número de membros do *ensemble* afetou a qualidade da previsão, obtendo-se soluções mais precisas com o *superensemble* que considerou mais membros. A aplicação de diferentes modelos reduz a incerteza nos resultados e aumenta a confiança e consistência das previsões.

Agradecimentos

Esta investigação foi financiada pelo Fundo Estratégico UIDB/04423/2020 e UIDP/04423/2020 através de fundos nacionais da FCT e do FEDER. Foi ainda financiado pelo projeto EsCo-Ensembles (PTDC/ECIEGC/30877/2017), FCT, NORTE 2020, Portugal 2020 e UE (FEDER).

REFERÊNCIAS

- Bastos, L., Bio, A., Pinho, J.L. et al. (2012). Dynamics of the Douro estuary sand spit before and after breakwater construction. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 109, 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.05.017>
- Iglesias, I, Venâncio, S., Pinho, J.L., et al. (2019a). Two Models Solutions for the Douro Estuary: Flood Risk Assessment and Breakwater Effects. *Estuaries and Coasts*, 42(2), 348–364. doi: 10.1007/s12237-018-0477-5
- Iglesias, I, Avilez-Valente, P., Bio, A., et al. (2019b). Modelling the Main Hydrodynamic Patterns in Shallow Water Estuaries: The Minho Case Study. *Water*, 11(5), 1040. doi: 10.3390/w11051040
- Iglesias, I, Bio, A., Bastos, L., et al. (2021). Estuarine hydrodynamic patterns and hydrokinetic energy production: The Douro estuary case study. *Energy*, 222, 119972. doi: 10.1016/j.energy.2021.119972
- Iglesias, I., Pinho, J.L., Avilez-Valente, P., et al. (2022). Improving Estuarine Hydrodynamic Forecasts Through Numerical Model Ensembles. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1–18. doi: 10.3389/fmars.2022.812255
- Melo, W., Pinho, J., Iglesias, I., et al. (2020). Hydro- and Morphodynamic Impacts of Sea Level Rise: The Minho Estuary Case Study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(6), 441. doi: 10.3390/jmse8060441
- Melo, W., Pinho, J.L., Iglesias, I., et al. (2022). Flood Risk Assessment at the Douro River Estuary. In S. Kolathayar, A. Mondal, & S. C. Chian (Eds.), *Lecture Notes in Civil Engineering (Climate Ch, pp. 37–49)*. Springer. doi: 10.1007/978-981-16-5501-2_4
- Mohan Das, D., Singh, R., Kumar, A., et al. (2017). A Multi-Model Ensemble Approach for Stream Flow Simulation. In *Modeling Methods and Practices in Soil and Water Engineering* (pp. 71–102). Oakville, ON; Waretown, NJ: Apple Academic Press. doi: 10.1201/b19987-5
- WMO. (2012). *Guidelines on Ensemble Prediction Systems and Forecasting*. World Meteorological Organization, Geneva. http://www.wmo.int/pages/prog/www/Document/s/1091_en.pdf