

Inundação das margens do estuário do Tejo: o caso da tempestade de fevereiro de 1941

A.B. Fortunato (1), P. Freire (1), X. Bertin (2), M. Rodrigues (1), M.L.R. Liberato (3, 4), e J. Ferreira (3)

- (1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, afortunato@lnec.pt.
 (2) UMR 7266 LIENSs, CNRS - Université de La Rochelle, 2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle Cedex, França.
 (3) Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), Vila Real, Portugal.
 (4) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Resumo: A margem sul do estuário do Tejo é composta por extensas áreas com cotas baixas, logo suscetíveis a inundações. A determinação da perigosidade associada a estas inundações é por isso fundamental para a gestão territorial. Uma das mais graves inundações do último século ocorreu em 15 de fevereiro de 1941, existindo poucos dados quantitativos sobre o evento. Este trabalho vem colmatar esta lacuna através da implementação, validação e exploração de um conjunto de modelos numéricos que permitiu determinar a extensão da inundação da margem sul do estuário do Tejo, caso se repetisse um fenómeno semelhante, e determinar a importância relativa dos principais agentes forçadores nos níveis extremos neste estuário. Os modelos implementados incluem um modelo atmosférico à escala regional e local, modelos de agitação marítima e de circulação à escala regional, e um modelo acoplado de circulação e de agitação marítima à escala do estuário. Mostra-se também que a modulação do *setup* devido à agitação marítima na embocadura gera um sinal semi-diurno que é amplificado por ressonância no interior do estuário.

Palavras-chave: modelação numérica; inundação; processos físicos; eventos extremos.

1. INTRODUÇÃO

As inundações costeiras constituem uma das maiores catástrofes naturais, e são agravadas pela subida do nível médio do mar. O desenvolvimento de mapas de inundação é por isso muito útil para a gestão territorial, e tornou-se um imperativo legal na Europa com a Diretiva Europeia das Inundações.

Estes mapas são tipicamente produzidos através de modelos numéricos (e.g., Fortunato *et al.*, 2013, Webster *et al.*, 2014, Perini *et al.*, 2016). Geralmente simulam-se eventos extremos recentes (e.g., Dietrich *et al.*, 2010, Bertin *et al.*, 2014) que estão bem documentados, existindo dados para validar as simulações, e simulações de larga escala para forçar os modelos locais. No entanto, existem zonas em que os eventos recentes não são os mais gravosos. Nestes casos, simular eventos mais antigos pode fornecer informação muito relevante sobre possíveis eventos catastróficos. A recente disponibilidade de bases de dados de *hindcasts* atmosféricos, como o 20CR (Compo *et al.*, 2011), abre o caminho à simulação e análise de eventos históricos.

As margens do estuário do Tejo são particularmente vulneráveis a inundações (Tavares *et al.*, 2015). No entanto, as inundações recentes têm sido modestas relativamente à que ocorreu durante a tempestade de 15 de fevereiro de 1941, uma das cinco maiores

tempestades que atingiu a Europa no século XX (Muir-Wood, 2011). Com pressões atmosféricas mínimas de 952 hPa em Lisboa, esta tempestade provocou dezenas de vítimas e grandes danos nas margens do estuário (Freitas e Dias, 2013).

Este trabalho visa, primeiro, avaliar a extensão da inundação no estuário do Tejo, em particular na zona da Lezíria de Vila Franca, caso ocorresse uma tempestade como a de 1941. As simulações são, por isso, efetuadas para as condições atuais. Avaliam-se também casos mais extremos, considerando uma subida do nível médio do mar de 0.5 m e a coincidência da tempestade com uma maré viva excecional. Dado que vários agentes físicos, atmosféricos, oceânicos e fluviais contribuem para a inundação, o segundo objetivo do estudo é determinar a importância relativa dos diferentes agentes forçadores nos níveis extremos.

A zona de estudo cobre o Atlântico Norte, no qual se simula a dinâmica da atmosfera e a geração da agitação marítima. As marés e as sobrelevações de origem atmosférica são simuladas no Atlântico NE. No estuário do Tejo simula-se a circulação e a agitação marítima acopladas.

2. DADOS

Utilizam-se os mais recentes dados topobatimétricos, fornecidos por várias entidades

(Fig. 1). A montante de Vila Franca, uma vez que só existem perfis transversais espaçados de 2.5 km, consideram-se secções retangulares, com uma profundidade linearmente variável (Fig. 2).

Os dados de caudal afluentes ao estuário foram estimados com base em medições de 1941 em Vila Velha de Rodão, e corrigidos para ter em conta a sua variação entre esta estação e a fronteira de montante do estuário. Dada a incerteza na determinação dos caudais, efetuou-se uma análise de sensibilidade aos caudais (Fortunato *et al.*, em prep.). Finalmente, os dados de níveis utilizados na validação do modelo são os descritos em Fortunato *et al.* (1999).

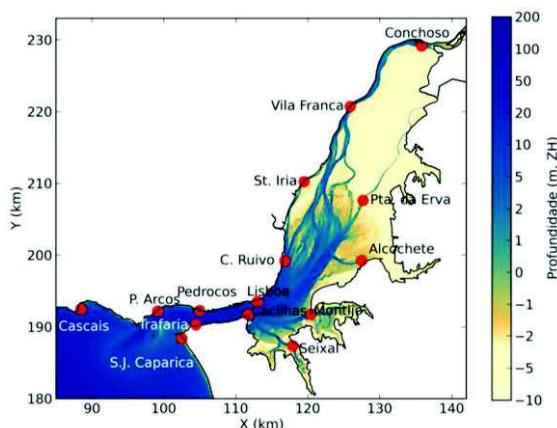


Fig. 1. Batimetria do estuário do Tejo sobre a malha de cálculo.

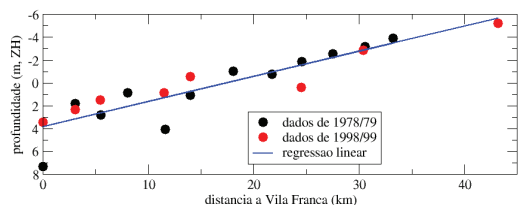


Fig. 2. Determinação da profundidade média do estuário a montante de Vila Franca.

3. MODELOS

O vento e a pressão atmosférica são simulados com o modelo WRF-AR (Skamarock *et al.*, 2008) usando duas malhas encaixadas com resoluções de 27 km e 9 km na horizontal e 32 camadas verticais. As condições iniciais e de fronteira provêm da base de dados CR20 (Compo *et al.*, 2011). Uma descrição detalhada da aplicação do modelo é apresentada em Ferreira *et al.* (2014).

A agitação marítima no Atlântico é simulada com o modelo WaveWatchIII (Toolman, 2009) com uma resolução de 0,5°. Os espectros são resolvidos com 24 frequências e 24 direções. O gelo é tido em conta de acordo com o procedimento descrito em Bertin *et al.* (2013). Os termos fonte e de dissipação são descritos em Bidlot *et al.* (2007).

Os níveis devidos à maré e agentes atmosféricos são simulados no Atlântico NE com o modelo SCHISM (Zhang *et al.*, 2016). A malha tem uma resolução de 250 m na costa Portuguesa. A aplicação está descrita em Fortunato *et al.* (2016).

Finalmente, a circulação e a agitação marítima são simuladas de forma acoplada com o modelo SCHISM-WWM (Roland *et al.*, 2012). A malha de cálculo (Fig. 3a) tem cerca de 140 000 nós e uma resolução da ordem de 20-30 m no interior do estuário. Colocar nós ao longo do coroamento dos diques (Fig. 3b) garante a correta reprodução da topografia nos locais mais críticos. Uma validação detalhada do modelo (e.g., Fig. 4) mostra que este consegue reproduzir corretamente a inundação em eventos extremos (Fortunato *et al.*, em prep.).

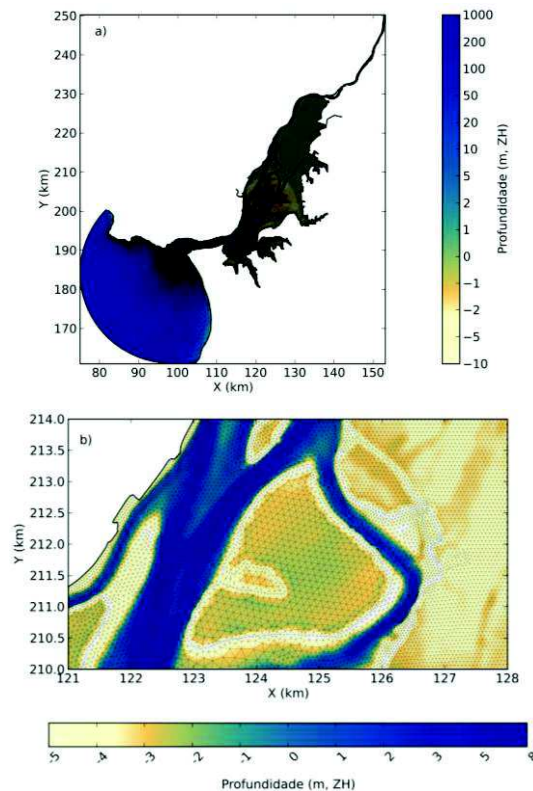


Fig. 3. Malha de cálculo (a) e detalhe na zona da Lezíria o mouchão do Lombo do Tejo (b).

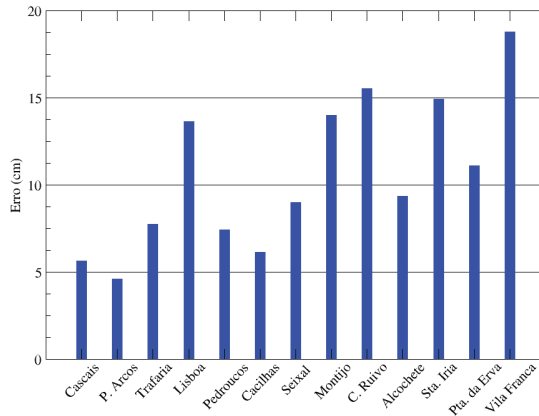


Fig. 4. Validação: erros quadráticos médios em preia-mar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados (Fig. 5a) mostram que uma tempestade semelhante à de 1941 causaria hoje algumas inundações na zona Sudoeste da Lezíria do Tejo. A zona do dique que foi galgada durante a

tempestade Xynthia (2010), a norte do mouchão do Lombo do Tejo, seria de novo galgada, apesar de ter sido alteada após esta tempestade. No entanto, a área inundada seria pequena, devido à existência de um segundo dique (Fig. 3b). Ocorreriam também inundações nos mouchões de Alhandra e da Póvoa. Estes problemas poderiam ser agravados se a maré tivesse maior amplitude. Nesse caso, a inundação incluiria também o mouchão da Póvoa, e o segundo dique da Lezíria seria também galgado (Fig. 5b). Finalmente, uma subida do nível médio do mar de 0.5 m agravará o problema significativamente: vastas zonas poderão ser inundadas nas margens esquerdas do Tejo e do Sorraia (Fig. 5c), apesar da proteção por diques.

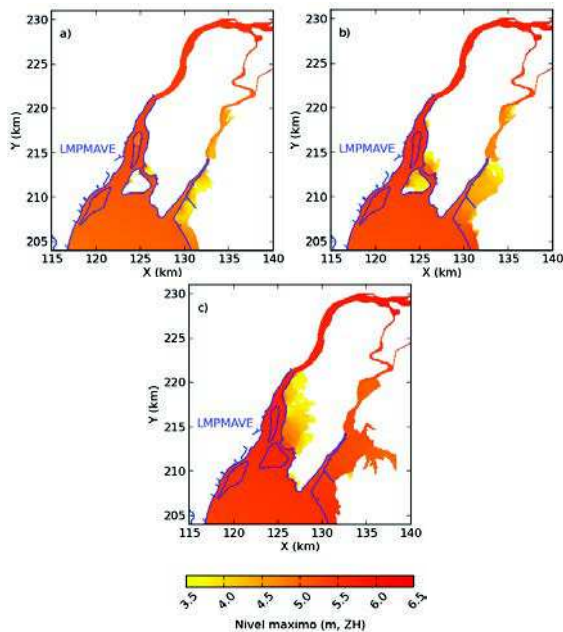


Fig. 5. Inundações na zona da Lezíria para a tempestade de 1941: a) simulação base; b) caso atual mais gravoso; c) subida do nível médio do mar de 0.5 m. A linha a azul representa a máxima preia-mar de águas vivas equinociais.

Várias simulações foram efetuadas para determinar as causas das sobrelevações ao longo do estuário (Fig. 6). Em geral, os resultados mostram que as sobrelevações crescem significativamente ao longo do estuário. Este crescimento não se deve à sobrelevação de origem meteorológica, que se mantém aproximadamente constante ao longo do estuário. Esta tem um período característico de cerca de um dia, não sendo por isso afetada pelo fenómeno de ressonância que amplifica as constituintes diurnas (Fortunato *et al.*, 1997). Pelo contrário, a sobrelevação devida à agitação marítima, também significativa, cresce ao longo do estuário. A agitação marítima na embocadura do Tejo é modulada pela maré (Rusu *et al.*, 2011), gerando por isso um *setup* com uma variabilidade semi-diurna. É este sinal que é amplificado no interior do estuário, explicando parcialmente o crescimento da sobrelevação total. Da mesma forma, o efeito do vento cresce no interior do estuário.

O efeito do caudal fluvial apenas é relevante na zona estreita do estuário, como mostrado anteriormente por Vargas *et al.* (2008). Os gradientes de pressão atmosférica e as ondas geradas localmente têm pouca expressão nos níveis máximos.

Finalmente pode existir uma diferença apreciável entre a sobrelevação total e a soma dos efeitos individuais. Esta diferença explica-se pelas interações não lineares entre os diferentes processos. Guerreiro *et al.* (2015) mostrou que o período de ressonância do estuário cresce com a subida do nível do mar, aumentando assim a amplificação dos sinais semi-diurnos. Da mesma forma, a subida do nível do estuário vai levar à amplificação de diferentes sinais, e o da maré em particular.

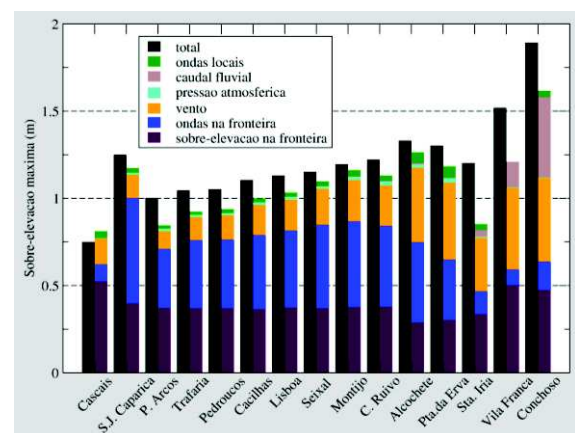


Fig. 6. Importância dos diferentes processos físicos ao longo do estuário.

5. CONCLUSÕES

O projeto BINGO (*Bringing INnovation to onGOing water management - a better future under climate change*) visa proporcionar conhecimento e ferramentas a vários *stakeholders* para lhes permitir lidar com eventos extremos, incluindo cheias e secas. O presente trabalho contribui para um dos casos de estudo deste projeto, o Tejo, identificando as zonas que poderão ser inundadas em caso de um evento extremo.

Os resultados mostram que várias zonas agrícolas da zona superior do estuário estão em risco de submersão, apesar de estarem protegidas por diques.

Estas inundações são causadas por diferentes agentes físicos que causam uma sobrelevação do nível da água que se sobrepõe à maré. A sobrelevação do nível do mar devido à pressão atmosférica e ao vento, e o *setup* devido às ondas são os dois principais agentes na generalidade do estuário. Para montante, os efeitos dos ventos locais e do caudal fluvial são também relevantes. A modulação pela maré do *setup* devido às ondas gera ainda um sinal semi-diurno que é amplificado no interior do estuário por ressonância.

Agradecimentos

Agradece-se o financiamento da Comissão Europeia, projeto H2020 BINGO (*Grant agreement n.* 641739), e da FCT (MR: bolsa SFRH/BPD/87512/2012; MLRL e JF: projeto STORMEx, FCOMP-01-0124-FEDER-019524; PTDC/AAC-CLI/121339/2010). Este trabalho tirou partido da rede nacional de computação (INCD). Agradece-se o fornecimento de dados pelo IH, APA, APL, DGT, IPMA, ABLGVFX e EMODNET.

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.
- Bertin, X., Li, K., Roland, A., Zhang, Y.J., Breilh, J.-F., & Chaumillon, E. (2014). A modeling-based analysis of the flooding associated with Xynthia, central Bay of Biscay. *Coastal Eng.*, 94: 80-89.
- Bidlot, J.R., Janssen, P.A.E.M., & Abdalla, S. (2007). A revised formulation for ocean wave dissipation and its model impact, *Tech. Memo*, 509, 29.
- Compo, G.P., Whitaker, J.S., Sardeshmukh, P.D., Matsui, N., Allan, R.J., *et al.* (2011). The twentieth century reanalysis project, *Quarterly J. of the Royal Meteorological Society*, 137: 1-28.
- Dietrich, J.C., S. Bunya, J.J. Westerink, B.A. Ebersole, J.M. Smith, *et al.* (2010). A high-resolution coupled riverine flow, tide, wind, wind wave and storm surge model for Southern Louisiana and Mississippi: Part II – synoptic description and analysis of hurricanes Katrina and Rita. *Monthly Weather Rev.*, 138: 378-404.
- Ferreira, J.A., Carvalho, A.C., Carvalheiro, L., Rocha, A., & Castanheira, J.M. (2014). On the influence of physical parameterisations and domains configuration in the simulation of an extreme precipitation event. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 68, 35-55.
- Fortunato, A.B., Baptista, A.M., & Luetlich, R.A. (1997). A three-dimensional model of tidal currents in the mouth of the Tagus Estuary. *Continental Shelf Res.*, 17(14), 1689-1714.
- Fortunato, A.B., Oliveira, A., & Baptista, A.M. (1999). On the effect of tidal flats on the hydrodynamics of the Tagus estuary. *Oceanologica Acta*, 22(1), 31-44.
- Fortunato A.B., Li K., Bertin X., Rodrigues M., & Miguez B.M. (2016). Determination of extreme sea levels along the Iberian Atlantic coast, *Ocean Engineering*, 111(1), 471-482.
- Fortunato, A.B., Freire, P., Bertin, X., Rodrigues, M., Liberato, M.L.R., & Ferreira, J. (em preparação). A numerical study of the February 15, 1941 Iberian storm in the Tagus estuary.
- Freitas J.G., Dias J.A. (2013). 1941 windstorm effects on the Portuguese Coast. What lessons for the future? *J. Coastal Res.*, Special Issue 65, 714-719.
- Guerreiro M., Fortunato A.B., Freire P., Rilo A., Taborda R., *et al.* (2015). Evolution of the hydrodynamics of the Tagus estuary (Portugal) in the 21st century. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15/1: 65-80.
- Muir-Wood, R., (2011). The 1941 February 15th Windstorm in the Iberian Peninsula. *Trébol*, 56, 4-13.
- Perini, L., Calabrese, L., Salerno, G., Ciavola, P., & Armaroli, C. (2016). Evaluation of coastal vulnerability to flooding: comparison of two different methodologies adopted by the Emilia-Romagna region (Italy), *Natural Hazards and Earth System Science*, 16, 181-194.
- Roland A., Zhang Y.J., Wang H.V., Meng Y., Teng Y.-C., *et al.* (2012). A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids. *J. Geophysical Res.*, 117, C00J33.
- Rusu, L., Bernardino, M., Guedes Soares, C. (2011). Modelling the influence of currents on wave propagation at the entrance of the Tagus estuary, *Ocean Engineering*, 38: 1174-1183.
- Skamarok, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., *et al.* (2008). A description of the advanced research WRF Version 3. *NCAR Technical Note*.
- Tavares A.O., Santos P.P., Freire P., Fortunato A.B., Rilo A., *et al.* (2015). Flooding hazard in the Tagus estuarine area: the challenge of scale in vulnerability assessments. *Environmental Science & Policy*, 51: 238-255.
- Tolman H.L. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH III, version 3.14. *NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276*, 194 p.
- Vargas, C., Oliveira, F.S.B.F., Oliveira, A., & Charneca, N. (2008). Flood vulnerability analysis of an estuarine beach: application to Alfeite sand spit (Tagus Estuary). *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 8(1), 25-43.
- Webster, T., McGuigan, K., Collins, K., & MacDonald, C. (2014). Integrated River and Coastal Hydrodynamic Flood Risk Mapping of the LaHave River Estuary and Town of Bridgewater, Nova Scotia, Canada. *Water*, 6/3: 517-546. DOI:10.3390/w6030517.
- Zhang Y.J., Ye F., Stanev E.V., Grashorn S. (2016). Seamless cross-scale modeling with SCHISM, *Oc. Modelling*. 10.1016/j.ocemod.2016.05.002.