



Revista de Gestão Costeira Integrada -
Journal of Integrated Coastal Zone
Management

E-ISSN: 1646-8872

rgci.editor@gmail.com

Associação Portuguesa dos Recursos
Hídricos

Vargas, Catarina I. C.; Oliveira, Filipa S. B. F.; Oliveira, Anabela; Charneca, Nuno
Análise da Vulnerabilidade de uma Praia Estuarina à Inundação: Aplicação à Restinga do
Alfeite (Estuário do Tejo)

Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management,
vol. 8, núm. 1, 2008, pp. 25-43
Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos
Lisboa, Portugal

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340123004>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

Análise da Vulnerabilidade de uma Praia Estuarina à Inundação: Aplicação à Restinga do Alfeite (Estuário do Tejo) *

*Vulnerability Analysis of an Estuarine Beach to Inundation: Application to
Alfeite Spit (Tagus Estuary)*

Catarina I. C. Vargas², Filipa S. B. F. Oliveira^{1,2}, Anabela Oliveira², Nuno Charneca²

RESUMO

A ocorrência de condições hidrodinâmicas extremas em zonas ribeirinhas de estuários e lagunas, ambientes privilegiados para a ocupação humana, pode conduzir a avultados prejuízos materiais e humanos. Revela-se prioritário o desenvolvimento de ferramentas de avaliação da vulnerabilidade destas regiões para apoio ao seu planeamento.

Neste estudo é proposta uma metodologia de base para a previsão de níveis extremos de inundação das zonas ribeirinhas de ambientes estuarinos resultantes da acção combinada de vários fenómenos hidrodinâmicos. Esta metodologia é aplicada ao estuário interno do Tejo, numa área cuja morfologia se tem mantido estável à mesoescala (década) e à escala anual: a restinga do Alfeite, na margem Sul do estuário. Os resultados desta aplicação foram integrados num MDT (Modelo Digital de Terreno), para facilitar a análise de vulnerabilidade da área em estudo aos fenómenos simulados. A metodologia proposta tem em conta os fenómenos indutores de inundação em zonas estuarinas e costeiras: i) elevados níveis de maré, ii) sobreelevação meteorológica, iii) sobreelevação associada a cheia, iv) subida do NMM (nível médio do mar) e v) agitação marítima em situação de tempestade. Trata-se de uma metodologia robusta que integra modelos amplamente divulgados e aplicados para estes fenómenos: modelo hidrodinâmico de ondas longas, modelo de geração – propagação de ondas pelo vento, e modelo morfodinâmico que simula o impacte da hidrodinâmica no perfil de praia. A futura substituição de cada um dos modelos aplicados por novos, mais avançados, permitirá, melhorar a precisão das previsões.

A previsão do impacte das condições hidrodinâmicas extremas verificadas no dia 29/01/06 no Alfeite permitiu avaliar a precisão da metodologia proposta por comparação do limite superior da escarpa (marca de limite de inundação) simulado e registado após a tempestade. A subavaliação em cerca de 40cm relativamente ao limite registado dever-se-á à não consideração do processo de espraião, às incertezas relativas às condições de vento, à falta de dados de agitação marítima extrema para calibrar o modelo de ondas, entre outros factores de menor peso. A análise dos resultados de simulação de cenários de níveis extremos de água em frente à restinga do Alfeite permitiu concluir que extremos de agitação marítima,

1 - autora correspondente: foliveira@lnec.pt

2 - LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

sobrelevação meteorológica e níveis excepcionais de maré astronómica são os fenómenos que mais contribuem para os níveis de inundação nesta zona do estuário. A subida do NMM agrava o impacte desses fenómenos a médio e longo prazo. A análise do MDT permite prever que a inundação da restinga terá início pelo seu extremo Este, estendendo-se o alagamento para o seu interior, ocorrendo, numa situação mais extrema, galgamento da duna primária com alagamento quase total da restinga. A alteração morfológica da praia, a destruição das dunas e do ecossistema de sapal, o assoreamento da baía do Seixal e a destruição de infraestruturas são alguns dos impactes possíveis da conjugação destes fenómenos.

Palavras-chave: risco de inundação, previsão de níveis extremos, hidrodinâmica estuarina e costeira, gestão costeira, estuário do Tejo.

ABSTRACT

The coastal areas sheltered from maritime storms are the most highly populated of the world. The Tagus Estuary in Portugal is an example of an estuarine zone of high population density that combines several types of anthropogenic pressures (barbour activities, human occupation of waterfronts, urban residual water discharges, among others) and an area of important ecological value (Tagus Estuary Natural Protected Area). The sustainable coexistence of these different uses requires in-depth knowledge of a number of existing risks. The vulnerability assessment of these waterfronts to extreme hydrodynamic conditions is commonly left to second plan when compared with directly exposed coastal environments or river environments, but these events may lead to huge environmental, structural and human damages.

This study proposes a generic methodology for the prediction of extreme levels of inundation in coastal embankments. These events result from the combined action of several hydrodynamic phenomena. This methodology is applied to the Alfeite spit, located in the South margin of the Tagus estuary, an area where significant medium-term (decade) and annual morphological alterations have not been verified. The results of this application were integrated in a DTM (Digital Terrain Model) to help the vulnerability analyses of the studied area to the simulated phenomena.

The proposed methodology accounts for the phenomena responsible for flooding in estuarine and coastal zones: i) high tide levels, ii) storm surge, iii) surge related with river flood, iv) mean sea level rise and v) wave characteristics in a storm situation. This robust methodology integrates well known and vastly applied models for these phenomena: an hydrodynamic model for long waves, a wind wave generation – propagation model, and a morphodynamic model to simulate the hydrodynamic impact on the beach profile (where occur the biggest alterations of free surface level). The future exchange of these models for new more advanced models will allow the increase of the predictions precision and thus, the improvement of the methodology.

The simulation of the extreme hydrodynamic conditions verified in 29/01/06 at Alfeite was used to evaluate the methodology precision when applied to this environment, by comparing the location of the scarp upper limit (mark of inundation limit) obtained by simulation with the one registered after the storm. The underestimation of about 40cm relatively to the observed data can be due to the non consideration of the swash process, to the uncertainty related with wind conditions, to the lack of wave climate information to proceed to wave model calibration, among other factors of less importance. Analysis of simulation results for extreme water level scenarios at Alfeite spit led to the conclusion that extreme wave heights, storm surge and exceptional tide levels are the phenomena which give the highest contribution for inundation levels in this estuarine area. Mean sea level rise intensifies the impact of these phenomena in the medium and long run. The Alfeite spit MDT, including the isolines of inundation from the scenarios, shows that the spit inundation would start at its East limit, would progress towards its internal region, and, in extreme conditions, with the occurrence of primary dune overwash almost all of the spit would be flooded. The beach morphological changes, the dune and the salt-marsh ecosystem destruction, the Seixal bay siltation and the infrastructures destruction (roads, beach infrastructures, and some military harbour structures) are some of the possible impacts of these phenomena.

Keywords: inundation risk, extreme levels prediction, coastal and estuarine hydrodynamic, coastal management, Tagus estuary.

1. MOTIVAÇÃO

Desde tempos remotos que o Homem, no momento da escolha do local onde se fixar, dá preferência a zonas estuarinas e lagunares, por serem ambientes abrigados de intempéries marítimas, abundantes em recursos naturais e de boas condições

de acesso e abrigo à navegação. Efectivamente, a maioria das cidades mundiais mais populosas situase precisamente nas zonas adjacentes a estes ambientes costeiros. Portugal não é excepção, com algumas das suas maiores cidades (Lisboa, Porto, Setúbal, Aveiro, Faro) localizadas junto de estuários e lagunas.

A ocupação humana destas regiões tem-se intensificado nas últimas décadas, aumentando a pressão sobre a linha de costa com a crescente artificialização das frentes ribeirinhas, facto que acentua a importância do estudo dos riscos naturais nestas zonas, em particular o risco de ocorrência de fenómenos hidrodinâmicos extremos.

As inundações são fenómenos que, num curto período de tempo (horas a dias), podem causar grandes prejuízos económicos, sociais e ambientais. De acordo com o último relatório do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (Meehl *et al.*, 2007), prevê-se o aumento da intensidade dos temporais marítimos em algumas regiões do globo e, consequentemente, o aumento do risco de inundaçao das zonas costeiras. As mais recentes projecções para a região da Europa prevêem aumento do risco de cheias (EEA, 2004), de inundações costeiras e de erosão costeira (Erosion, 2004). As previsões de Andrade *et al.* (2006), no âmbito do Projecto SIAM (*Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts, and Adaptation Measures*), reforçam a possibilidade de aumento da intensidade da agitação em situação de temporal. O impacte das inundações será intensificado pela subida do NMM prevista (Nicholls *et al.*, 2007), a menos que sejam atempadamente aplicadas medidas de mitigação. O incentivo ao estudo da evolução recente e projecção futura destes fenómenos bem como o estabelecimento de medidas adaptativas para minimização dos seus impactes é um dos objectivos mais importantes do 7.º Programa Quadro de financiamento à investigação europeia.

É da coincidência de vários fenómenos hidrodinâmicos extremos (e.g., nível de maré elevado, com tempestade e cheia) que resultam as inundações de consequências mais graves, sendo demonstrativo disto mesmo as maiores inundações ocorridas nos últimos 50 anos na zona ribeirinha de Lisboa (Andrade *et al.*, 2006). Para além de danos económicos e sociais directos, as inundações podem ter consequências ambientais desastrosas, nomeadamente: a transição para zonas húmidas de terrenos ribeirinhos mais baixos, a destruição das zonas húmidas e a afectação da biodiversidade e libertação de produtos tóxicos devido ao alagamento de estações de tratamento de águas residuais ou de fábricas. No entanto, a maioria dos estudos de inundaçao em zonas ribeirinhas não considera todos os fenómenos relevantes em jogo, nem as suas interacções.

O conhecimento da frequência de valores extremos de fenómenos hidrodinâmicos e respectivos períodos de retorno (baseado em longas séries de

registos) é de grande utilidade prática para projectar portos e outras estruturas costeiras, estimar limites de zonas de inundaçao, e apoiar a gestão integrada destas zonas, prevenindo deste modo riscos económicos, sociais e ambientais mais avultados.

A maior consciencialização para esta problemática, motivada sobretudo pelas grandes inundações que têm ocorrido na Europa Central e do Norte, tem conduzido ao aparecimento de directrizes europeias que visam minimizar as suas consequências. A Proposta de Directiva do Parlamento e Conselho Europeu relativa à avaliação e gestão do risco de inundaçao (Comissão das Comunidades Europeias, 2006) estabelece linhas estratégicas para a promoção de uma acção concertada na definição dos planos de gestão de risco de inundaçao de bacia hidrográfica e área costeira afectadas. Esta proposta foi já aprovada pelo Parlamento e Conselho Europeu em 25/04/2007, estabelecendo 2015 como ano limite para a definição dos planos de gestão do risco de inundaçao por cada estado membro. Também na Comunicação da Comissão das Comunidades Europeias (2004), que define uma Estratégia Temática sobre Ambiente Urbano refere-se que “a expansão das cidades deve ser planificada e inserir-se numa estratégia global a longo prazo, com impactos ambientais identificados e minimizados (...). As alterações climáticas futuras podem implicar que os actuais planos para novas urbanizações já não sejam adequados, por exemplo devido a maiores riscos de inundações.”

Em Portugal, as preocupações relativas aos impactos de níveis extremos em zonas ribeirinhas têm vindo a aumentar. Andrade *et al.* (2006) propõem uma estratégia para a criação de ferramentas de apoio à decisão na minimização de impactes de níveis do mar extremos em Portugal que inclui: o aumento dos locais de recolha de informação mareográfica, para melhorar a previsão e projecção dos fenómenos; a melhoria da cobertura topográfica da faixa ribeirinha até à curva de nível dos 10m acima do NMM; e a determinação de limites de inundaçao, para a construção de cartas de vulnerabilidade que apoiem a tomada de decisão sobre os usos possíveis nas zonas marginais. Pretende-se que a “Estratégia de Gestão Integrada da Zona Costeira Nacional”, neste momento em elaboração, e as medidas resultantes da aplicação da Directiva relativa à avaliação e gestão do risco de inundaçao, que deverá ser transposta para o direito nacional até 2009, sejam instrumentos impulsionadores da definição de medidas que minimizem os impactes decorrentes de inundações e da subida do NMM em estuários e lagunas.

Em ambientes estuarinos, na transição entre rio e costa aberta, ocorre a combinação de fenómenos hidrodinâmicos extremos típicos de ambientes fluviais e costeiros. Na determinação de cotas extremas de inundação em áreas ribeirinhas de estuários actuadas por agitação marítima de origem oceânica ou local, não é suficiente a utilização isolada de modelos de simulação das condições hidrodinâmicas junto à costa (ondas e correntes litorais), prática corrente em costa aberta, ou de modelos hidrodinâmicos de ondas longas (utilizados em estuários abrigados da agitação oceânica e sem condições de desenvolvimento de ondas no seu interior), sendo necessário recorrer a uma combinação dos dois tipos de modelos. A determinação de cotas extremas de inundação em margens estuarinas arenosas requer, em particular, a aplicação de um modelo morfodinâmico do perfil de praia, possibilitando uma definição dinâmica dos limites inundáveis.

Este estudo tem, portanto, como objectivo principal estabelecer uma metodologia de previsão de níveis de inundação, decorrentes de fenómenos hidrodinâmicos extremos, em margens arenosas (praias) de ambientes estuarinos.

A metodologia é implementada no estuário do Tejo e testada na restinga do Alfeite, localizada na margem Sul deste sistema (Figura 1). Com base nos limites de inundação calculados para determinados cenários e apresentados em MDT, desenvolve-se uma análise da vulnerabilidade desta zona estuarina a níveis de água extremos, com utilidade na sua gestão integrada.

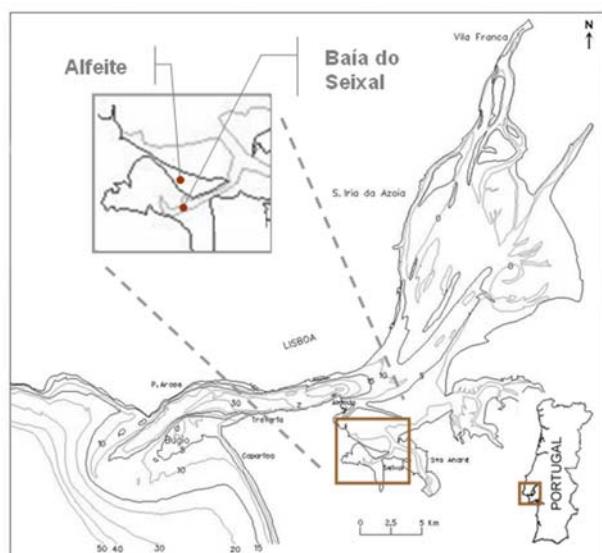


Figura 1. Estuário do Tejo e restinga do Alfeite.
Figure 1. Tagus estuary and Alfeite spit.

Com efeito, o estuário interno do Tejo, apesar de estar protegido das ondas de geração oceânica pelo seu estreito canal de embocadura (Oliveira, 2000), tem uma extensão de *fetch* suficiente para a geração e propagação de ondas no seu interior. A configuração particular deste estuário (Figura 1) exige, portanto, uma abordagem integrada e inovadora na avaliação do impacte combinado de níveis de água elevados, agitação marítima e correntes de maré presentes neste ambiente, combinando modelos que simulem os vários processos.

2. METODOLOGIA

A metodologia proposta permite simular a contribuição dos seguintes fenómenos na indução de níveis de água extremos (NAE):

- maré astronómica (MA);
- caudal fluvial (C);
- sobreelevação meteorológica (SM);
- fenómenos decorrentes da agitação marítima (AM) gerada no estuário interno; e
- subida do NMM (SNM).

O nível máximo atingido num determinado instante numa zona ribeirinha de um sistema de características hidrodinâmicas semelhantes às do estuário interno do Tejo, representado esquematicamente na Figura 2, é dado pela soma da contribuição de cada um dos agentes intervenientes nesse instante:

$$\text{NAE} = \text{MA} + \text{C} + \text{SM} + \text{AM} + \text{SNM} \quad (1)$$

Esta metodologia integra vários modelos de modo a que a previsão da acção combinada dos fenómenos intervenientes na inundação seja possível: um modelo hidrodinâmico de ondas longas, um modelo de geração – propagação de ondas curtas, e um modelo morfodinâmico que simula a evolução morfológica do perfil de praia. Os vários passos da metodologia consistem em:

1 – Modelar a evolução espacial e temporal da superfície livre e correntes de maré no estuário do Tejo com o modelo hidrodinâmico ELCIRC (Zhang *et al.*, 2004) (aplicação descrita em detalhe em Rocha *et al.*, 2007). Nestas simulações é imposta a maré na fronteira jusante do modelo e o caudal do rio na fronteira montante (escolhida de forma a não ter influência de maré). Assim obtém-se o nível de superfície livre atingido em frente à área de estudo e

respectiva corrente de maré no período de interesse do estudo;

2 – Estimar os parâmetros de onda em frente à praia, recorrendo a um modelo de geração - propagação de ondas (modelo SWAN, Booij *et al.* (1999), aplicado ao estuário do Tejo conforme descrito por Santos *et al.*, 2006), impondo a elevação determinada no passo 1 da metodologia e as condições de vento a simular;

3 - Prever o nível alcançado pelas ondas na praia, utilizando um modelo que simula a hidrodinâmica, o transporte sedimentar e a evolução do fundo ao longo de um perfil de praia transversal à linha de costa (faixa do estuário onde ocorrem as maiores alterações de nível de superfície livre, devido ao empolamento das ondas, rebentação, *setup* e espraio). Note-se que o modelo utilizado, modelo LITPROF (DHI, 2007b), considera todos os processos hidrodinâmicos relevantes à excepção do espraio, conforme se descreve em Vargas *et al.* (2007). Conhecida a topo-hidrografia inicial e as características granulométricas ao longo do perfil, são impostas, no ponto inicial do perfil, séries temporais de dados de nível do mar, de corrente de maré, e de parâmetros de agitação marítima, calculados conforme os passos anteriores (1 e 2) da metodologia. O topo da escarpa desenvolvida no perfil de praia é a cota de inundação (Figura 2).

Na Figura 3 encontra-se esquematizada a metodologia anteriormente descrita, na sua aplicação à restinga do Alfeite.

Para prever níveis excepcionais de inundação e avaliar os respectivos impactes na área de estudo foram definidos cenários de inundação

(subsecção 3.3) que combinam valores extremos dos fenómenos hidrodinâmicos (subsecção 3.2). Os níveis de inundação determinados são apresentados em MDT sobre imagem de satélite, permitindo concluir sobre o impacte de fenómenos hidrodinâmicos extremos nesta área. É avaliada a precisão da aplicação da metodologia à área de estudo (subsecção 3.4) simulando as condições hidrodinâmicas verificadas no evento de tempestade marítima registado a 29 de Janeiro de 2006.

3. APLICAÇÃO

3.1 Área de estudo

A restinga do Alfeite fica situada na margem Sul do estuário interno do Tejo (Figura 1). Esta restinga, bem como outras praias e restingas de areia nesta zona, desenvolveram-se devido à sua exposição à acção da agitação marítima predominante de N-NE (direcção dos ventos dominantes e de maior *fetch* do estuário interno). Estudos recentes de caracterização da evolução geomorfológica desta formação permitem concluir que as alterações que se têm registado ao longo da última década (Freire, 1999; Valente *et al.*, 2006) e à escala anual (Oliveira & Vargas, 2007; Vargas *et al.*, 2007) são negligenciáveis.

Em termos morfológicos, a restinga do Alfeite tem uma cota máxima de 6,20m acima do ZH no istmo a Oeste, reduzindo progressivamente a sua cota para Este, direcção do seu crescimento entre os sécs. XVI e XX (Freire, 1999). Ela é limitada a Norte pela praia do Alfeite (com valor económico enquanto espaço de uso balnear e de apanha de bivalves), rodeada por canais de navegação para o trânsito de *catamarans*

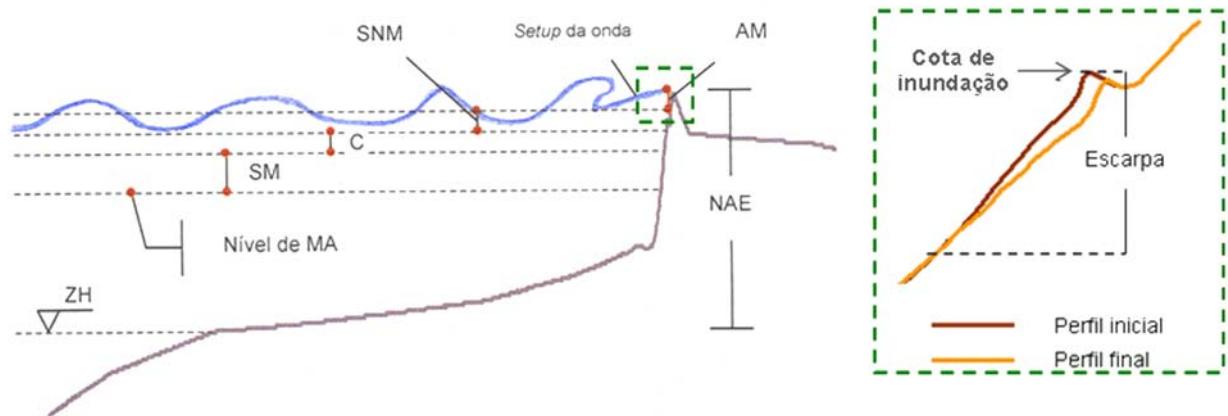


Figura 2. Esquema dos fenómenos hidrodinâmicos contribuintes para o nível de inundação (topo da escarpa).
Figure 2. Scheme of the hydrodynamic phenomena which contribute for the inundation level (scarp upper limit).

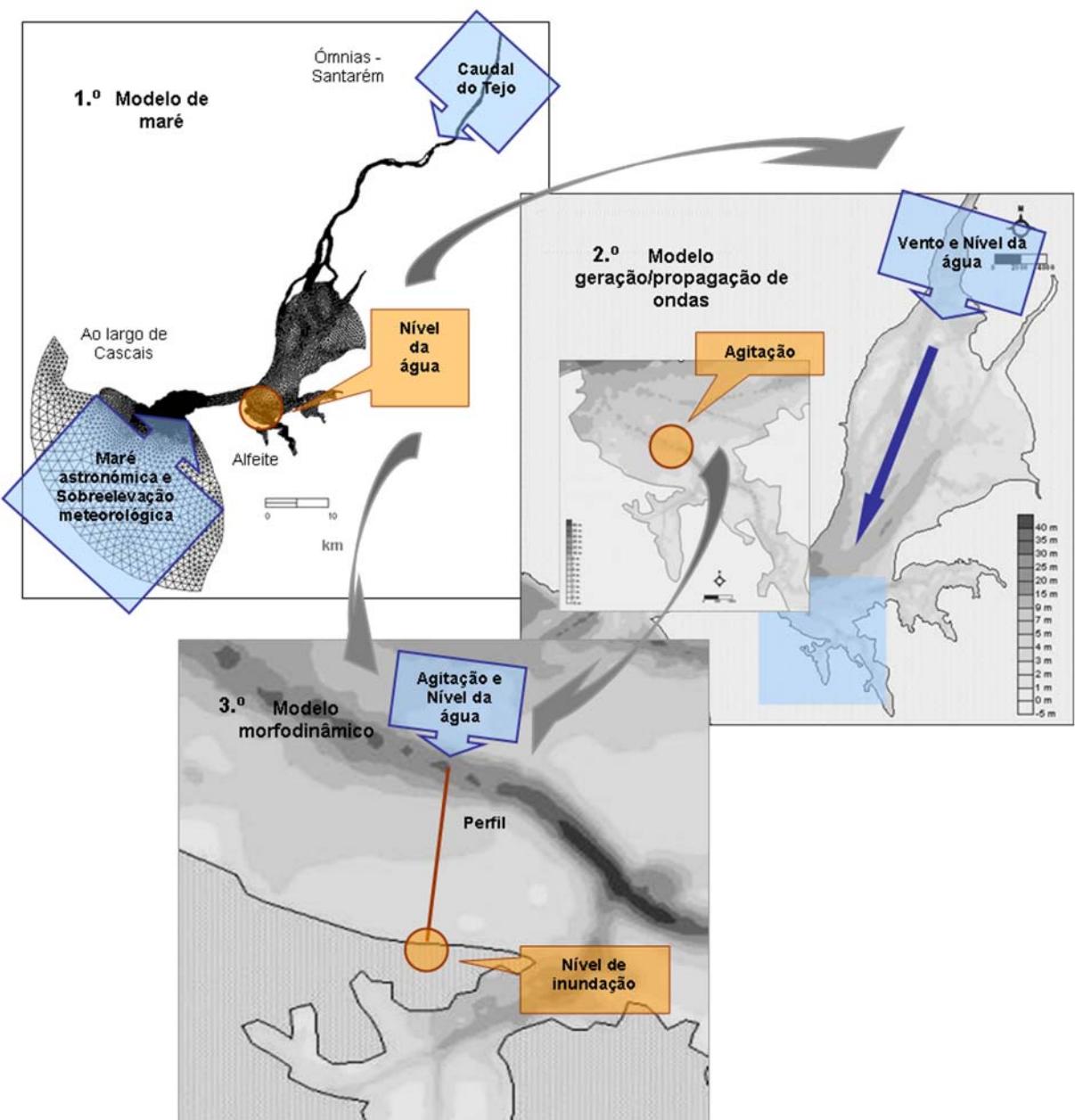


Figura 3. Esquema da metodologia de previsão de níveis de inundação no Alfeite.
Figure 3. Methodology scheme for inundation levels prediction in Alfeite.

(Canal do Barreiro a Norte e do Seixal a Este), pelo cais de acostagem do Seixal a Sudeste, pela base naval do Alfeite a Oeste e pelo Sapal de Corroios (zona de interesse ecológico) a Sudeste.

3.2 Fenómenos hidrodinâmicos

Apresentam-se de seguida os vários fenómenos hidrodinâmicos, possíveis consequências e o conhecimento estatístico dos seus extremos na área de aplicação.

Maré

A amplitude de maré no estuário do Tejo aumenta da embocadura para montante, até à zona da Póvoa de Sta. Iria, e decresce depois para montante até Vila Franca de Xira. Este aumento é mais pronunciado no canal e mais lento na zona do estuário interno (Fortunato *et al.*, 1999).

Em Cascais, junto à fronteira jusante, a amplitude máxima média de maré é de 3,50m (Tabela 1), com base nas previsões do IH (Instituto Hidrográfico) para o período de 1980 a 2003.

Tabela 1. Valores médios das previsões de maré do IH, para Cascais, para o período de 1980 a 2003.
Table 1. Mean values of IH tide predictions at Cascais, for the 1980-2003 period.

	Amplitude de maré [m]	Nível de preia-mar (acima do ZH) [m]
Águas vivas	2,79	3,47
Máximo	3,50	3,83

Caudal Fluvial

As flutuações do caudal fluvial têm maior importância na zona montante do estuário interno do Tejo, decrescendo a influência deste fenómeno com o alargamento da secção de escoamento para jusante (Elias, 1992). É expectável, portanto, que um grande aumento de caudal tenha pouca expressão na sobreelevação do nível de superfície livre na região do Alfeite.

Em condições médias de escoamento o caudal fluvial do rio Tejo pode ser representado, na fronteira montante, precisamente na estação hidrométrica de Ómnias - Santarém (módulo do escoamento médio para a série hidrológica de 1990/91 a 2002/03, SNIRH, <http://snirh.pt/>), pelo caudal fluvial anual médio de 335m³.s⁻¹.

Relativamente a caudais extremos, a cheia de 1979, com um caudal médio diário registado em Ómnias de aproximadamente 12 000m³.s⁻¹, foi considerada a maior cheia ocorrida no Tejo nos últimos 100 anos. O caudal médio diário correspondente ao período de retorno de 50 anos, derivado a partir da curva de escoamento médio diário da cheia de 1979 por Rocha *et al.* (2007), estima-se em aproximadamente 9 500m³.s⁻¹.

Sobreelevação meteorológica

Os estudos de análise de registos de sobreelevação meteorológica na costa portuguesa têm-se restringido à costa aberta de Portugal Continental (zonas costeiras cobertas por marégrafos). Taborda & Dias (1992) desenvolveram o primeiro estudo sistemático de sobreelevações ocorridas ao longo da costa portuguesa, tendo analisado os dados de 8 estações maregráficas num período em que decorreram os temporais de Fevereiro - Março de 1978 e de Dezembro de 1981. Observaram valores máximos de sobreelevação em Cascais (fronteira jusante do estuário do Tejo) de 0,42 e 0,52m para cada uma destas tempestades, respectivamente. Mais recentemente, Andrade *et al.* (2006) estimaram valores de sobreelevação de 0,54 e 0,58m para os períodos de retorno 50 e 100 anos, por aplicação da distribuição de Gumbel (1958) à série de valores máximos anuais de sobreelevação do nível do mar em Cascais.

Uma sobreelevação no interior do estuário poderá produzir impactes importantes devido à área extensa e profundidade média reduzida desta região. Este fenómeno poderá conduzir, *e.g.*, a galgamentos da orla marginal, com consequente erosão de áreas de sapal ou de restingas e praias, e à injecção de sedimentos grosseiros no interior das zonas marginais.

No dia 29/01/06 ocorreu a conjugação do anticiclone dos Açores localizado nas Ilhas Britânicas e uma depressão a Oeste do território Continental Português (Figura 4a). Através da Figura 4b, em que é apresentada a sobreelevação na fronteira jusante (resultante da diferença entre o nível do mar registado e a maré astronómica prevista para o dia), verifica-se que o pico de baixa pressão atravessou a região por volta das 13h produzindo uma sobreelevação de aproximadamente 0,33m em Cascais.

Agitação marítima

A praia do Alfeite é actuada exclusivamente por ondas geradas no estuário interno. O regime de agitação marítima anual médio em frente ao Alfeite caracteriza-se por ondas com Hrms entre 0,05 e 0,40m

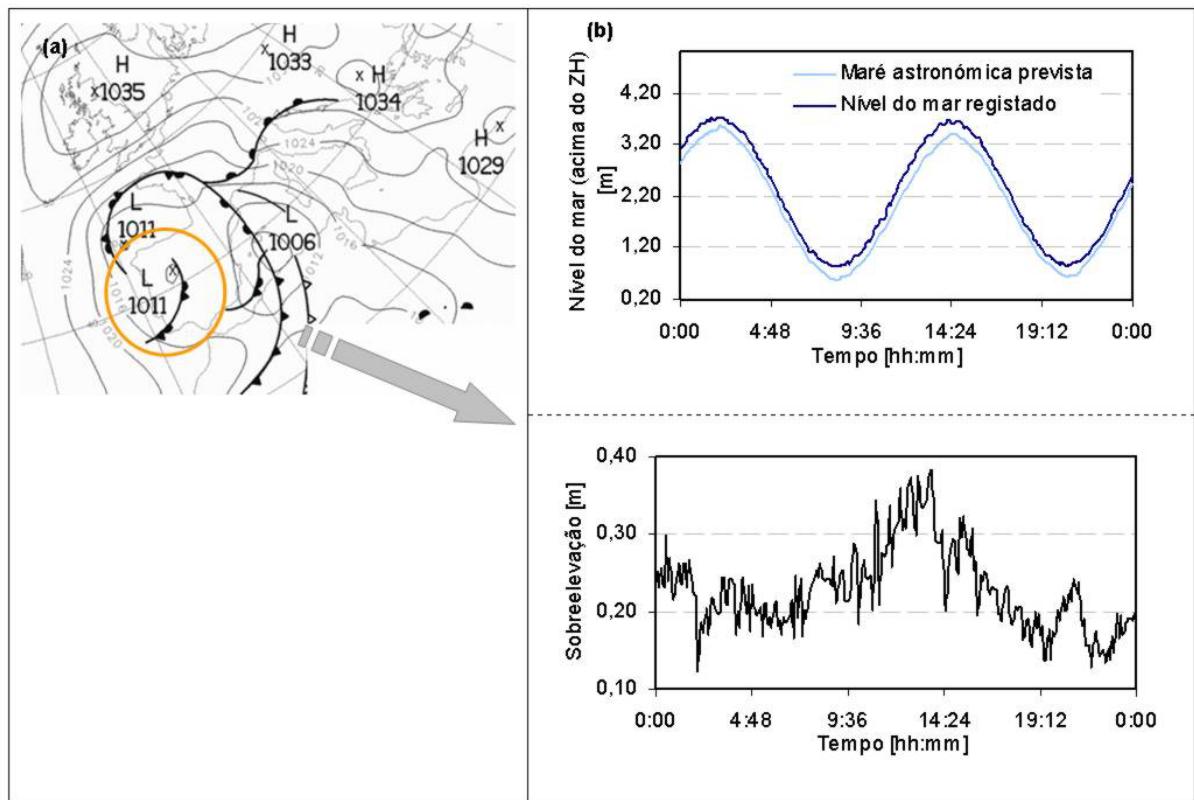


Figura 4. Informação meteorológica e maregráfica de dia 29/01/06: (a) carta de superfície (Fonte: www.westwind.ch/); (b) sobre-elevação na fronteira jusante.

Figure 4. Meteorological and mareographical information at 29/01/06: (a) surface chart (Source: www.westwind.ch/); (b) surge at downstream boundary.

propagando-se do quadrante Norte, com origem nos ventos do mesmo quadrante com maior frequência de velocidades entre 1,0 e 6,0 m.s⁻¹ (Oliveira & Vargas, 2007; Vargas *et al.*, 2007). O impacte da agitação marítima resultante de condições meteorológicas mais adversas não pode ser negligenciado quando se estuda a vulnerabilidade da restinga à inundação.

A agitação marítima observada no interior do estuário do Tejo no dia 29 de Janeiro de 2006 atingiu características pouco habituais na zona. Analisando os registos da estação meteorológica Lisboa/Gago Coutinho do Instituto de Meteorologia (IM), entre as 14 e as 22 horas deste dia (Figura 5), o vento, soprando do octante NE, alcançou velocidades superiores a 8,0 m.s⁻¹ que, de acordo com apuramentos climatológicos do IM (1994), são consideradas excepcionais. Note-se que a esta direcção do vento corresponde a maior extensão de *fetch* do estuário interno.

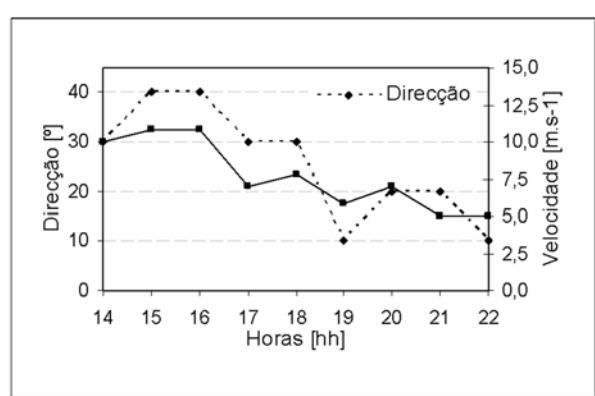


Figura 5. Parâmetros de vento de 29/01/06 (Fonte: IH, 2006).

Figure 5. Wind parameters at 29/01/06 (Source: IH, 2006).

Do processo de transformação das ondas que se propagam em direcção à costa, resultam uma série de fenómenos contribuintes para o nível alcançado pelo mar (*setup*, espraio e galgamento por espraio e/ou por inundação). Em regime de tempestade, alturas de onda mais elevadas produzem um *setup* maior, logo, a susceptibilidade à inundação é também maior. Da mesma forma, em geral, o espraio das ondas atinge níveis tanto mais elevados de perfil de praia quanto maior a energia das ondas. O galgamento ocorre quando o nível de espraio da onda ou o nível do mar com sobre-elevação excede o limite máximo da praia (altura da crista da duna primária), classificando-se em galgamento por espraio ou galgamento por inundação, respectivamente (Donnelly *et al.*, 2005). Na sequência da tempestade de 29/01/06 foram registados vestígios de galgamento por inundação na área mais elevada da restinga do Alfeite (no istmo - parte Oeste da restinga) (Figura 6b). Note-se que o processo de espraio não é considerado na metodologia estabelecida, pelo que é expectável a subestimação dos níveis de inundação calculados.

Subida do nível médio do mar

Prevê-se que os estuários, lagunas e rias sejam as zonas costeiras mais afectadas pela subida do NMM (Ferreira *et al.*, 2001). Entre estes ambientes, os estuários do Sado e do Tejo e as rias de Aveiro e Formosa, de margens densamente povoadas, serão provavelmente os mais afectados a nível social e

económico, dada a morfologia suave dos terrenos adjacentes.

Em termos de impactes ambientais da subida do NMM, poderão ocorrer perdas de importantes extensões ribeirinhas. O previsível assoreamento destas bacias de maré costeiras conduzirá à perda de sapais, com repercussões directas na nidificação e migração de aves, a fenómenos de subsidência e à substituição da morfologia plana intertidal com canais subtídiais pouco profundos, por rasos de maré mais altos e canais subtídiais mais profundos (Pethick, 1996). É também expectável a salinização de aquíferos e a ampliação da intrusão salina em estuários. Grande parte destas regiões está classificada ou identificada como de interesse ecológico segundo convenções internacionais, pelo que a subida do NMM resultará na perda de áreas de importante valor ecológico.

Têm-se vindo a realizar vários estudos para conhecer a evolução recente do NMM com base na análise de dados de estações maregráficas. Entre os estudos a nível global salientam-se os desenvolvidos por King (1975) e Pirazzolli (1986), nos quais se concluiu ter ocorrido uma subida de 1,5mm.ano⁻¹ em Portugal (não são referidos as estações, os dados e a metodologia utilizados) e de 1,4mm.ano⁻¹ em Cascais (fronteira jusante deste estudo), respectivamente. Dos estudos para a costa portuguesa destacam-se os de Costa (1987) e Dias & Taborda (1988, 1992), que mostram ter-se verificado subidas de 1,2 e 1,3mm.ano⁻¹ na fronteira jusante, respectivamente.

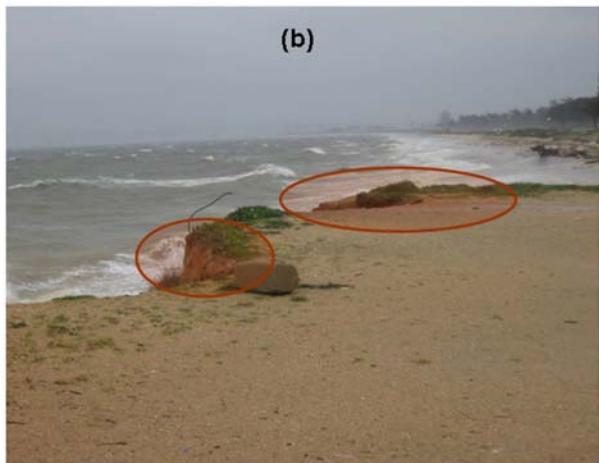
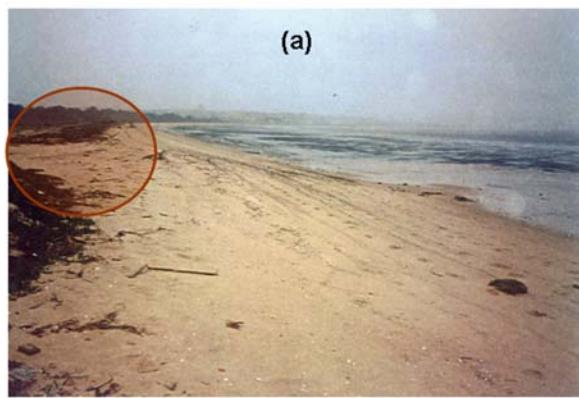


Figura 6. Vestígios de galgamentos ocorridos em Março de 1996 (Fonte: Freire, 1999) (a) e no dia 29/01/06 (por cortesia da Dr.^a Paula Freire) (b).

Figure 6. Residual marks of overwash that took place in March 1996 (Source: Freire, 1999) (a) and at 29/01/06 (Dr. Paula Freire courtesy) (b).

Os estudos de evolução recente do NMM servem de base à projecção da evolução do NMM. O grau de incerteza associado a estas previsões resulta da reduzida dimensão temporal das séries de registos maregráficos disponíveis. Para a área de interesse deste estudo, a série maregráfica de Cascais é a mais longa registada em Portugal, com mais de um século. Admitindo que a evolução do NMM no século XXI é semelhante à evolução observada no século passado, a projecção da taxa média de subida no NMM para este século seria 1,3mm.ano⁻¹, de acordo com Dias & Taborda (1988, 1992). Considerando a actual aceleração da subida no NMM, será prudente considerar uma taxa de evolução superior. Dias & Taborda (1988) ensaiaram um ajustamento exponencial à série maregráfica de Cascais, que revelou um coeficiente de correlação 0,71:

$$y = 56,27 (1,012)^{(x-1880)} + 2000 \quad (2)$$

Em que x é o ano civil e y é o NMM em mm.

As projecções do NMM no futuro, num horizonte de 50 e 100 anos, em relação ao NMM no corrente ano de 2007 são, para este ajustamento, de 0,21 e 0,59m, respectivamente.

3.3 Cenários

Antes de descrever os cenários estabelecidos note-se que não devem ser somados extremos de cada fenômeno (*e.g.*, nível elevado de maré astronómica + sobreelevação meteorológica + agitação marítima + projecção da subida do NMM), pois é esperável que um evento com esta combinação de extremos tenha uma baixa probabilidade de ocorrência, sendo pouco realista (Bell & Coco, 2005). Seria de todo o interesse avaliar o impacte de cenários de período de retorno conhecido. Face à insuficiência de dados hidrodinâmicos do estuário interno, tal não é possível.

Os cenários estudados são apresentados na Tabela 2 e combinam:

- Os valores de sobreelevação determinados em Cascais para os períodos de retorno 50 e 100 anos (Andrade *et al.*, 2006), assumindo que estes valores não variam muito na fronteira jusante;
- As projecções de subida do nível do mar para os anos de 2057 e 2107 em Cascais, segundo o ajustamento exponencial de Dias & Taborda (1988), e assumindo mais uma vez que estas poucos variam para a fronteira jusante;
- Os caudais fluviais anual médio, e das cheias de período de retorno 50 e 100 anos (Rocha *et*

al., 2007) na fronteira montante;

- Os níveis de preia-mar de águas vivas médio e de preia-mar máxima médio (tabelas de maré do IH de 1980 a 2003) na fronteira jusante; em preia-mar, com as correntes de maré a transitarem do sentido enchente para vazante, os valores do módulo da corrente são negligenciáveis (menores valores ao longo de um ciclo de maré);
- A agitação marítima no interior do estuário para o evento excepcional de vento, de 10,8m.s⁻¹ soprando de 40°N, registado no dia 29/01/06, considerada em todos os cenários.

Assume-se como cenário de referência a combinação do nível previsto de preia-mar de águas vivas médio na fronteira jusante, 3,47m acima do ZH, com o caudal fluvial anual médio na fronteira montante, 335m³.s⁻¹. O cenário mais gravoso testado corresponde à coincidência de sobreelevação meteorológica de período de retorno de 100 anos, com nível previsto de preia-mar de águas vivas médio, para o NMM projectado para o ano de 2107 na fronteira jusante, com caudal de cheia dos 100 anos na fronteira montante, e agitação marítima resultante da tempestade excepcional registada recentemente no estuário interno.

Note-se que nos cenários definidos não se considera o impacte da corrente de maré nos níveis de inundação. Com efeito, por recurso ao modelo hidrodinâmico e de transporte sedimentar LITDRIFT (DHI, 2007a), verifica-se que a influência de um pico de maré em frente à praia (corrente longitudinal de 0,3 m.s⁻¹) no nível de inundação a determinar é negligenciável para as condições hidrodinâmicas testadas nos vários cenários e verificadas no dia 29/01/06.

3.4 Avaliação da precisão da metodologia

A precisão desta metodologia, quando aplicada à restinga do Alfeite, foi avaliada para a tempestade marítima registada a 29 de Janeiro de 2006, comparando os impactes previsto e registado no perfil de praia da área de estudo. Claramente, a precisão da metodologia depende dos modelos matemáticos que a integram. Por isso, a sua futura melhoria deverá ser feita através da substituição de cada um dos modelos aplicados por novos, mais avançados.

Conhecidos o caudal médio mensal em Ómnias para o mês de Janeiro de 2006, 642m³.s⁻¹, e o nível de maré do dia 29/01/06 registado pelo marégrafo de Cascais, simulou-se o nível do mar no estuário do

Tabela 2. Cenários estabelecidos para níveis extremos.

Table 2. Established sceneries for extreme water levels.

Cenários	Caudal na fronteira montante (Ómnias) [$m^3.s^{-1}$]			Fronteira jusante (foz do Tejo)					
	Anual médio	Cheia dos 50 anos	Cheia dos 100 anos	Amplitude de maré [m]		Sobreelevação meteorológica [m]		Subida NMM [m]	
				Máx. média	Águas vivas média	50 anos	100 anos	Ano 2057	Ano 2107
Ref.									
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
	335	9 500	12 000	3,50	2,79	0,54	0,58	0,21	0,59

Legenda:

Cenário de referência
Teste isolado de cada fenómeno
Cenário mais gravoso

Tejo para um período de 10 dias (de 21 a 31 de Janeiro) e analisou-se o resultado em frente à praia do Alfeite para o dia da tempestade. A tempestade marítima coincidiu com uma maré viva (preia-mar de águas vivas 3,40m acima do ZH em Cascais). De modo análogo ao observado nos dados, verifica-se que a amplitude de maré simulada para o Alfeite é ligeiramente superior à registada em Cascais (Figura 7a), assim como um pequeno desfasamento temporal em preia-mar e baixa-mar (ligeiro atraso no Alfeite).

O nível simulado para o Alfeite pelo modelo de maré é superior ao previsto pelo IH para o porto secundário do Arsenal do Alfeite (Figura 7b). Este resultado era expectável dado que a simulação inclui o efeito de sobreelevação não considerado nas previsões de maré astronómica (Figura 4b).

Na Figura 8a apresentam-se as séries dos parâmetros de onda (obtidas com o modelo de geração - propagação para as condições de vento) e níveis de superfície livre (resultantes do modelo de maré) do episódio de tempestade (Figura 5). Constatase que as maiores alturas de onda coincidem com o período mais elevado de maré e com direcções perpendiculares ao perfil de praia (entre 0° e 20°N).

Por fim, a alteração morfológica do perfil de praia

simulada com o modelo morfodinâmico (resultante da acção das condições hidrodinâmicas na Figura 8a), pode ser comparada com a alteração de perfil registada após o evento de tempestade marítima (Figura 9). O topo da escarpa simulado situa-se 42cm abaixo do registado, indicativo de que os níveis de inundação determinados para os cenários estabelecidos de condições hidrodinâmicas extremas serão inferiores aos que se registariam na realidade.

A subestimação do nível de inundação explica-se pelos erros associados à aplicação de cada modelo e aos valores de registos utilizados:

- Os erros quadráticos médios nas elevações devidas à maré, avaliados para 1972 em 13 estações ao longo de todo o estuário, são de 9cm por defeito, sendo da mesma ordem de grandeza na zona do Alfeite (Fortunato *et al.*, 1999).
- A não consideração do processo de espraio no modelo morfodinâmico tem como consequência uma redução da região activa da praia, com uma subavaliação do nível máximo atingido pelas ondas, conforme já concluído antes, através da comparação de resultados numéricos com resultados de experimentação laboratorial (Oliveira, 2005).

- Apesar do modelo de geração – propagação de ondas ser amplamente aplicado para a simulação de condições de agitação marítima na aproximação a ambientes de costa aberta, ele carece de calibração para condições de tempestade em ambientes de *fetich* restrito, objectivo que é logicamente de difícil concretização.

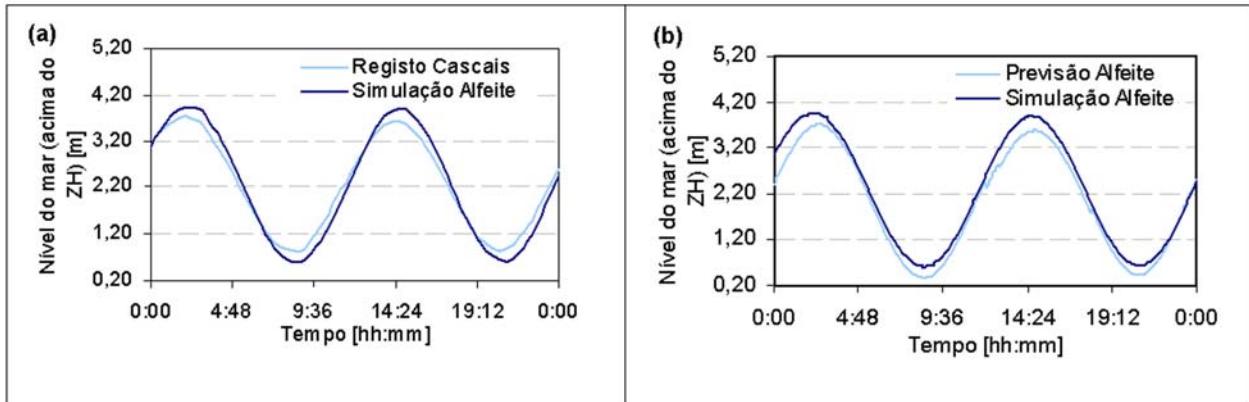


Figura 7. Comparação do nível de superfície livre simulado em frente ao Alfeite com o registado em Cascais (a) e o previsto no Alfeite (b) a 29/01/06.

Figure 7. Comparison of simulated free surface level in front of Alfeite with the one registered in Cascais (a), and with the one predicted for Alfeite (b) at 29/01/06.

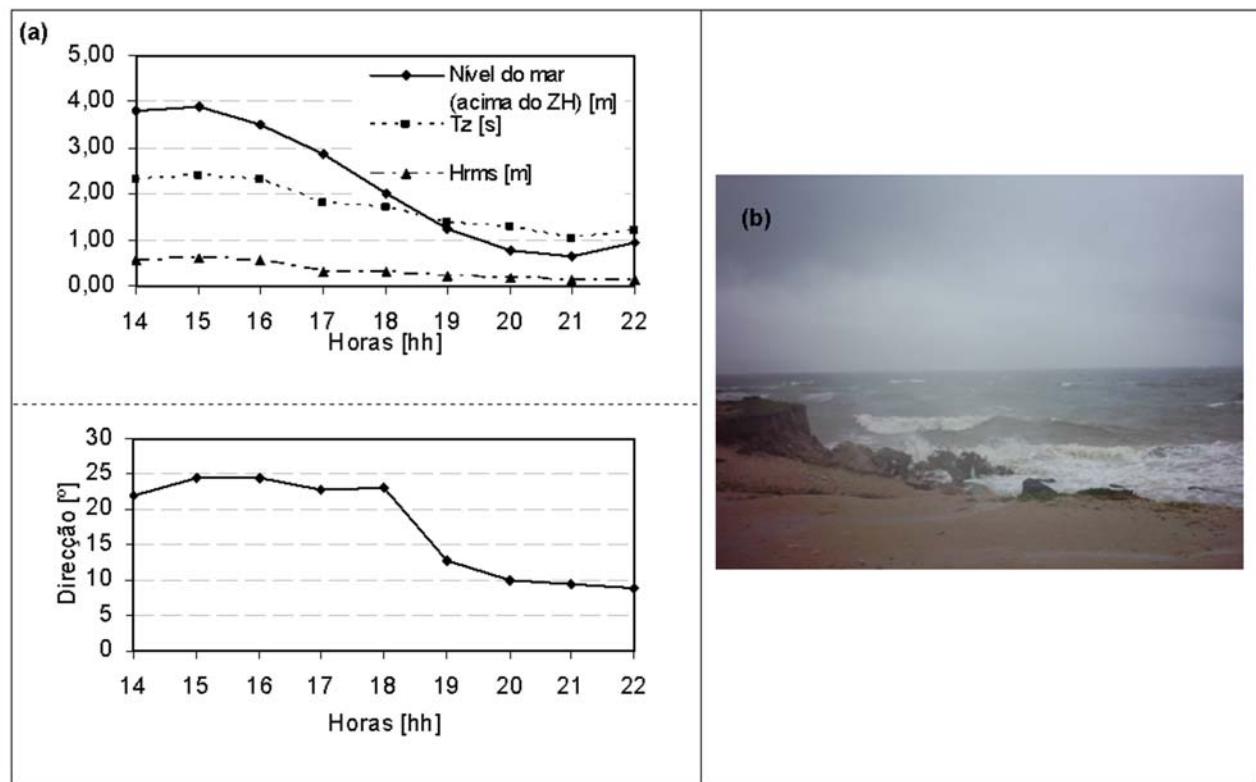


Figura 8. Parâmetros de agitação marítima simulados (a) e panorama das condições hidrodinâmicas no Alfeite (b) para o dia 29/01/06.

Figure 8. Simulated storm wave parameters (a) and hydrodynamic conditions snapshot at Alfeite beach (b) at 29/01/06.

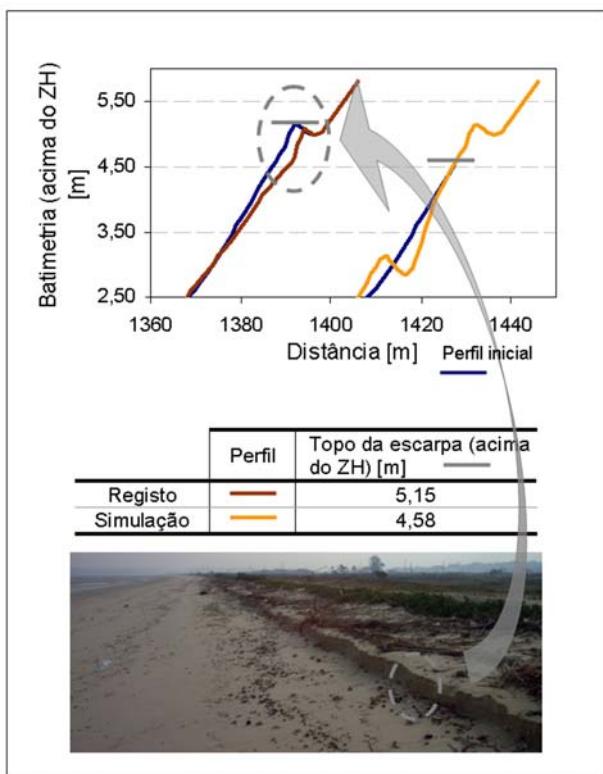


Figura 9. Comparaçao das alterações de perfil registada e simulada.

Figure 9. Comparison between registered and simulated profile changes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Determinado o nível de inundação alcançado em cada um dos cenários através da metodologia proposta, prevê-se galgamento da duna primária no cenário 7, o mais gravoso, e níveis de inundação coincidentes com o nível registado na tempestade de

dia 29/01/06 para os cenários 1, 2 e 4 (Figura 10). O galgamento da duna primária da praia retratado na Figura 6a, produzido por condições hidrodinâmicas extremas ocorridas em Março de 1996, confirma a ocorrência relativamente recente no Alfeite de eventos com impacte semelhante ao determinado para o cenário mais gravoso estudado.

Analizando os resultados das simulações da superfície livre no interior do estuário do Tejo, obtidos por forçamento da fronteira jusante com sobreelevação (com origem meteorológica e nas projecções de subida do NMM) conjugada com o nível de maré de águas vivas média e por forçamento da fronteira montante com o caudal anual médio (cenários: de referência, 1, 2, 3, 4 e 7), verifica-se uma correlação linear entre a sobreelevação imposta na fronteira jusante e o nível estimado em frente à praia do Alfeite (Figura 11). Esta correlação permite, para as condições de nível de maré astronómica e de caudal do Tejo (nas fronteiras jusante e montante, respectivamente) que estão na sua origem, extrapolar o nível de água em frente ao Alfeite para uma dada sobreelevação (na gama dos 0,00 a 1,20m) na fronteira jusante.

Nos cenários em que apenas se variou o caudal do Tejo na fronteira montante (cenários de referência, 5 e 6), verifica-se que esta variação produz um aumento de nível de água pouco significativo no estuário interno em frente à restinga do Alfeite, de 1 cm no máximo (cenário da cheia dos 100 anos relativamente ao cenário de caudal médio anual). Com efeito, um elevado nível da água devido a um pico de caudal de cheia é atenuado assim que alcança o estuário interno, devido ao elevado alargamento da secção de escoamento, pelo que a sobreelevação produzida é desprezável.

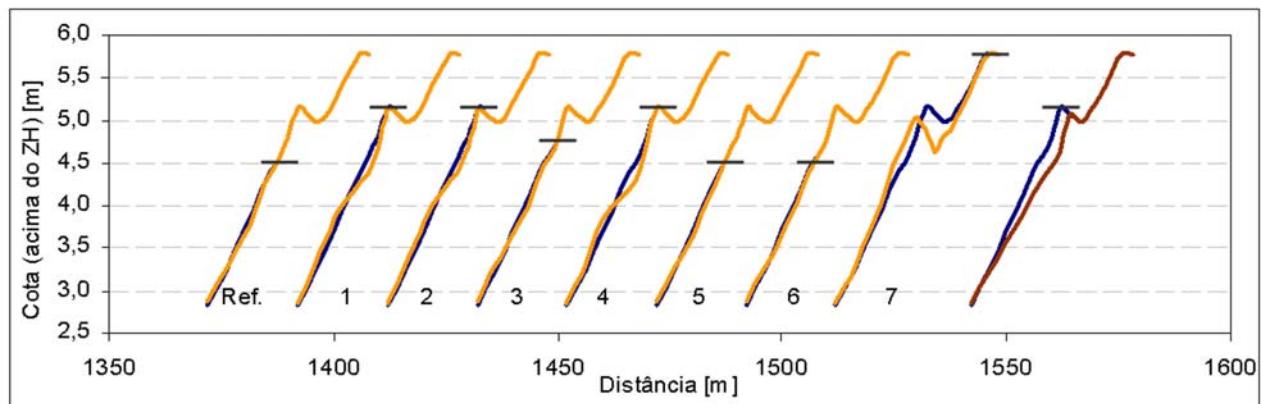


Figura 10. Relação entre o nível simulado em frente à praia do Alfeite e a sobreelevação na fronteira jusante.

Figure 10. Simulated level in front of Alfeite beach vs surge at downstream boundary.

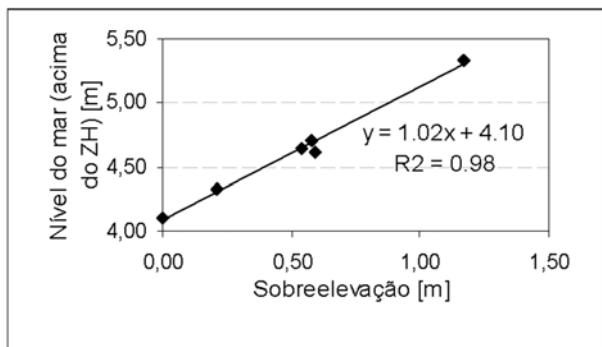


Figura 11. Nível de inundação função do nível da água e da altura de onda simulados em frente ao Alfeite.
Figure 11. Inundation level vs water level and wave height simulated in front of Alfeite.

A variação da altura de onda na sua aproximação à linha de costa é um fenómeno directamente dependente do nível de água. No entanto, no caso da restinga do Alfeite ela é pouco significativa de cenário para cenário exactamente porque os níveis de superfície livre simulados são muito elevados, o que reduz a influência do fundo (raso de maré) na atenuação da energia das ondas. As ondas determinadas (H_{rms} aproximadamente 0,60 m, conforme Tabela 3) têm um peso significativo no nível de inundação simulado, já que são responsáveis por um aumento de cerca de 0,50m no nível de inundação relativamente aos níveis simulados em frente à área

de aplicação.

Em síntese, os extremos de agitação marítima, de sobreelevação meteorológica e de maré astronómica são os fenómenos que, pela sua maior importância na indução de níveis de inundação, requerem especial atenção durante o desenvolvimento e melhoria de uma metodologia de previsão de níveis de inundação nas margens de estuários com as características do estuário interno do Tejo. Por outro lado a subida do NMM contribui para o agravamento das consequências dos três fenómenos indicados acima.

Seria de grande interesse uma análise probabilística dos cenários estabelecidos uma vez que os fenómenos implicados nos cenários de inundação, à excepção da maré astronómica, são dependentes entre si (resultam de variações de pressão atmosférica). Ter-se-ia, portanto, de determinar a probabilidade de ocorrência combinada dos vários fenómenos, só possível com vários anos de registos hidrodinâmicos no interior do estuário. No entanto, esta tarefa não é viável uma vez que as séries existentes são de duração reduzida (e.g., série maregráfica com um ano de duração, Fortunato *et al.*, 1999). Em estudos recentes de previsão de inundações têm vindo a ser aplicados métodos para a previsão da probabilidade combinada de extremos (e.g., os estudos de Viegas (2006), Andrade *et al.* (2006) e GIOC (2000) para ambientes de costa aberta; e de Różinski *et al.* (2007) para uma zona estuarina).

Tabela 3. Nível de água e altura de onda, observados e calculados, à entrada e dentro do estuário, para os cenários estabelecidos.

Table 3. Water level and wave height, observed and calculated, at the entrance and inside the estuary, for the established scenarios.

Cenário	Observação na fronteira jusante	Simulação em frente à restinga do Alfeite*		Simulação na praia**
	Nível do mar máx. (acima do ZH) [m]	Nível da água máx. (acima do ZH) [m]	H_{rms} [m]	Nível de inundação [m]
Ref	3,47	4,11	0,56	4,6
1	4,01	4,65	0,57	5,2
2	4,05	4,71	0,57	5,2
3	3,68	4,32	0,56	4,8
4	4,06	4,61	0,57	5,2
5	3,47	4,12	0,56	4,6
6	4,43	5,12	0,59	5,2
7	4,64	5,34	0,60	5,8

* No início do perfil de praia

** No final do perfil de praia

Os níveis de inundação calculados foram integrados no MDT para a restinga do Alfeite. Este MDT, em que são mapeadas as isolinhas dos níveis de inundação calculados para os vários cenários (Figura 12), é o resultado da combinação de informação topo-hidrográfica em formato vectorial de várias origens: i) Carta Topo-hidrográfica do Estuário do Tejo do IH (última actualização em 2005); ii) Carta Militar 1/25 000, n.º 144, série M888 do Instituto Geográfico do Exército; iii) pontos levantados com um GPS (*Global Positioning System*) em trabalho de campo realizado para cobrir zonas da restinga mais propensas a alterações (Ponta dos Corvos, no limite Este da restinga, berma e duna

primária); e iv) levantamentos topo-hidrográficos de três perfis transversais à praia por recurso a estação total fixa no ponto mais elevado de um dos perfis. Seria possível uma melhor representação do terreno caso existisse informação topo-hidrográfica com maior resolução espacial e toda recolhida na mesma data (salienta-se que a carta i) é constituída por informação de diferentes datas).

Por análise do mapeamento das isolinhas de inundação da restinga do Alfeite, supondo um alagamento progressivo da restinga devido à subida do nível de inundação, é possível antecipar que: a Ponta dos Corvos seria a primeira região afectada; o alagamento desta região alastrar-se-ia para o interior

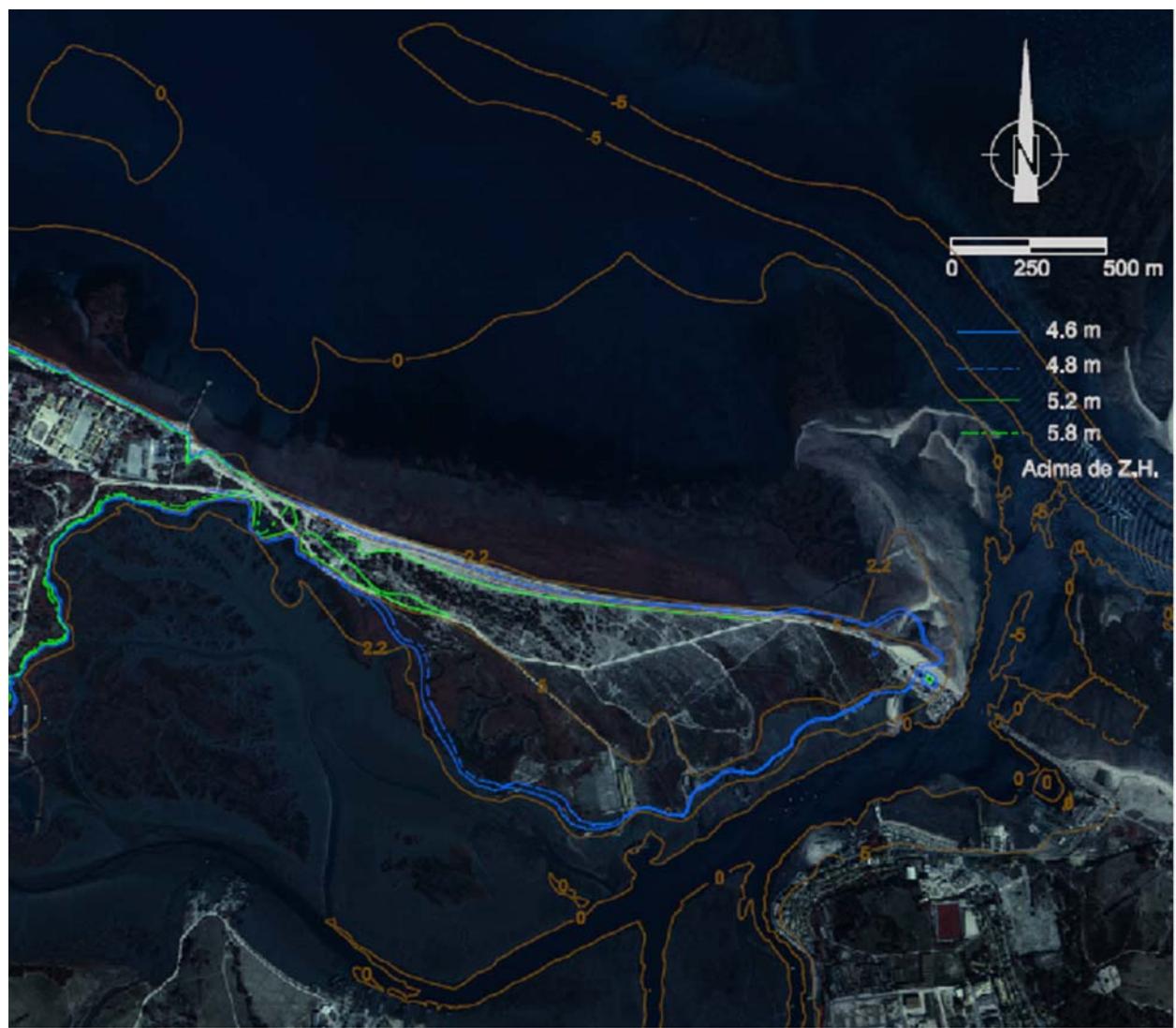


Figura 12. MDT da restinga do Alfeite, com identificação das isolinhas de inundação determinadas.
Figure 12. Alfeite spit DTM identifying the determined inundation isolines.

da restinga; e, para níveis mais elevados acabaria por ocorrer galgamento da duna primária da praia, com praticamente toda a restinga a ser alagada à excepção da região do istmo (região mais elevada da restinga com cota máxima de 6,20m acima do ZH). Nesta situação extrema ocorreria uma alteração significativa da morfologia da restinga devido ao intenso transporte sedimentar resultante da forte tensão de fundo induzida por ondas e correntes, e consequente destruição da vegetação protectora e do corpo dunar, bem como a alteração do ecossistema de sapal.

Salienta-se, a variabilidade longitudinal de exposição da face da praia relativamente à acção da onda. Tal facto deve-se à variabilidade da extensão do raso de maré. A menor extensão de raso na região Oeste da restinga permite antecipar que a rebentação ocorre mais próximo da linha de costa do que a verificada na região central e Este da restinga.

Na sequência de um galgamento total da restinga poderá existir uma tendência de migração da restinga para sul, com injecção de sedimentos no Sapal de Corroios e Baía do Seixal e desequilíbrio deste ecossistema traduzido em danos na sua flora e fauna. É igualmente espectável uma alteração da morfologia do raso de maré, na vertente norte da restinga, com consequências para a sua fauna bêntica. Em termos de infraestruturas, o apoio de praia situado no extremo Este da restinga e as vias de comunicação na sua zona central (estrada principal com orientação NW-SE, que liga o istmo da restinga ao seu extremo Este, e restantes caminhos) seriam as primeiras a ser afectadas, seguindo-se a base naval do Alfeite.

Tendo em conta os cenários de inundação estudados, recomenda-se a restrição da ocupação das zonas identificadas como vulneráveis à inundação, tendo em atenção que os resultados desta análise subavaliaram as faixas de inundação. O MDT também poderá ser melhorado o que só será possível com a recolha de informação topo-hidrográfica mais detalhada desta região ribeirinha.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo estabeleceu-se uma metodologia para a determinação de níveis de inundação em margens arenosas de estuários protegidos da agitação marítima oceânica mas com condições para geração e propagação de ondas no seu interior. Esta metodologia foi aplicada ao estuário interno do Tejo impondo condições hidrodinâmicas de ocorrência excepcional neste ambiente. A definição de uma metodologia de previsão de impactes de condições

hidrodinâmicas extremas em ambientes costeiros abrigados é de grande importância na medida em que, sendo as suas margens intensamente procuradas para ocupação humana e possuindo ambientes naturais com elevado valor patrimonial, um evento extraordinário pode provocar danos avultados. O estudo do impacte de níveis de inundação nestes ambientes costeiros tem sido relegado para segundo plano sendo dada prioridade a zonas de costa aberta ou a regiões ribeirinhas estritamente influenciadas pelo caudal de rios. Pretende-se que a metodologia proposta constitua, através do seu aperfeiçoamento, uma ferramenta que apoie de forma eficaz a elaboração de cartas de vulnerabilidade fundamentadas nos processos hidrodinâmicos característicos destas zonas ribeirinhas, ferramentas essenciais ao planeamento da sua ocupação. A utilização de modelos amplamente conhecidos, testados e aplicados na simulação dos processos hidrodinâmicos (modelo ELCIRC de hidrodinâmica de ondas longas, modelo SWAN de geração – propagação de ondas curtas e modelo LITPROF de morfodinâmica de perfil de praias arenosas) dão garantia de robustez à metodologia adoptada. A combinação destes modelos constitui um importante passo de inovação nesta área, ao permitir que, em ambientes tão complexos como o estuário do Tejo, os processos físicos relevantes sejam considerados de forma integrada.

Aplicando a metodologia à restinga do Alfeite para simular o impacte das condições hidrodinâmicas conhecidas para um evento de tempestade marítima recente, foi estimado um nível de inundação cerca de 40cm inferior ao registado. A subestimação do nível da água deve-se aos erros associados à aplicação dos modelos e aos dados de origem, entre os quais se destacam: a não consideração do processo de espraião no modelo morfodinâmico de perfil de praia; a incerteza associada às condições de vento; a ausência de dados de agitação marítima que permitam calibrar o modelo de geração – propagação de ondas curtas em condições de tempestade (seriam necessárias séries de registos de agitação marítima suficientemente extensas para cobrirem episódios excepcionais nesta zona); e erros médios quadráticos de aproximadamente 9cm por defeito na previsão das elevações da maré nesta zona do estuário. Note-se que para as condições extremas de agitação marítima simuladas o efeito das correntes de maré no nível de inundação na área de estudo é negligenciável, razão pela qual estas correntes não foram consideradas na aplicação da metodologia.

A aplicação da metodologia na previsão de níveis de inundação extremos na restinga do Alfeite foi precedida da análise de estudos de probabilidade de ocorrência e de projecção de fenómenos hidrodinâmicos extremos no estuário e da definição de cenários teóricos de coincidência destes fenómenos. Os resultados das simulações para os vários cenários definidos permitem concluir que a sobreelevação meteorológica, a agitação marítima de tempestade e níveis extremos de maré astronómica são os fenómenos de maior impacte na ocorrência de inundação na restinga do Alfeite, a qual é agravada pela subida do nível do mar.

O mapeamento no MDT da restinga do Alfeite dos limites de inundação obtidos para os vários cenários estudados permite desenvolver uma avaliação preliminar da vulnerabilidade desta formação geológica à inundação. Por observação do MDT, é possível antecipar que a inundação desta formação iniciar-se-ia pelo seu extremo Este, estendendo-se o alagamento para o seu interior e, num cenário mais gravoso, acabaria por ocorrer galgamento da duna primária com alagamento quase total da restinga. Em termos de impactes: a praia, dunas e regiões de sapal sofreriam alterações morfológicas em resultado de galgamentos, com eventual destruição da vegetação dunar e do ecossistema de sapal; poderia haver uma tendência de recuo da restinga para sul e de assoreamento da baía do Seixal devido a injecção de areia resultante de galgamentos e arrastamento; as vias de comunicação sobre a restinga, o apoio de praia a Este e a base naval do Alfeite seriam as infraestruturas afectadas. Faz-se notar que, se a informação topo-hidrográfica disponível tivesse melhor resolução espacial, haveria menor incerteza na análise de vulnerabilidade apresentada.

A aplicação desta metodologia deverá ser precedida do estudo da distribuição de probabilidade de ocorrência conjunta de vários fenómenos extremos, o que permite identificar condições extremas realistas a simular tendo em conta o risco associado (não é razoável simular eventos de probabilidade muito remota, resultantes da ocorrência simultânea de vários fenómenos excepcionais). A análise de registos geológicos de eventos de inundação nas áreas de estudo pode apoiar o estudo de probabilidade de ocorrência e de identificação de limites de inundação. Estudos de projecção da tendência evolutiva da frequência e intensidade dos fenómenos de origem climática (cheias, sobreelevações meteorológicas e ventos de elevada intensidade) poderão enriquecer o estudo de limites

de inundação, permitindo obter futuramente cartas de vulnerabilidade à inundação incentivando um planeamento que considere as alterações climáticas.

No que concerne a melhorias futuras da metodologia apresentada, salienta-se a necessidade de desenvolvimento e aplicação de um modelo morfodinâmico bidimensional que permita simular as rápidas alterações morfológicas e hidrodinâmicas em situação de tempestade (em substituição do modelo de perfil) e a consideração dos processos de espraio e galgamento nesse mesmo modelo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos Luís Simões Pedro, Vítor Pisco e Dr. Lourival Trovisco pela produção do MDT para a restinga do Alfeite; ao Dr. Nuno Lima pelo tratamento dos pontos levantados com GPS; ao Dr. Alexandre Coli pelas simulações de geração - propagação de onda em frente à praia do Alfeite; à Dr.^a Paula Freire, ao Dr. Rui Taborda e à Dr.^a Ana Silva pelos levantamentos topo-hidrográficos dos perfis de praia e toda a informação sedimentológica; ao Eng.^o João Rocha e Eng.^o João Fernandes pelo estabelecimento dos caudais na fronteira de montante do modelo hidrodinâmico; ao Prof. Joseph Zhang e Prof. António Melo Baptista pelo modelo ELCIRC; e à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento no projecto BERNA (POCTI/CTA/45431/2002) http://www.dha.lnec.pt/nec/english/studies/berna/berna_uk.html.

BIBLIOGRAFIA

- Andrade, C., Pires, H.O., Silva, P., Taborda, R. & Freitas, M.C. (2006) - Zonas Costeiras. In: F.D. Santos e P. Miranda (eds.), "Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto SIAM II", Gradiva, Lisboa.
- Bell, R.G. & Coco, G. (2005) - Natural Hazards Management: Wave-assisted coastal flooding. *Water & Atmosphere*. 13(1), 16-17. Disponível em: http://www.niwasscience.co.nz/__data/assets/pdf_file/0004/51565/flooding.pdf.
- Booij, N., Ris, R.C. & Holthuijsen, L.H. (1999) - A Third-generation Wave Model for Coastal Regions, Part I, Model Description and Validation, *J. Geophysical Research*, 104 (C4), 7649-7666.
- Comissão das Comunidades Europeias (2004) - COM(2004) 60: *Comunicação da Comissão ao Conselho, ao Parlamento Europeu, ao Comité Económico e Social e ao Comité das Regiões "Para uma estratégia*

- temática sobre ambiente urbano”, 60, de 11 de Fevereiro de 2004, 58 p. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2004:0060:FIN:PT:PDF>.
- Comissão da Comunidades Europeias (2006) - COM(2006) - 15 final: Proposta de directiva do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à avaliação e gestão de inundações, 15 final, de 18 de Janeiro de 2006, 20 p. Disponível em: http://europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/site/pt/com/2006/com2006_0015pt01.pdf
- Costa, C.N.L. (1987) - Tendência evolutiva do nível médio do mar nos portos de Leixões, Cascais e Lagos. Instituto Hidrográfico, 9 p.
- DHI (2007a) - LITDRIFT – Longshore Current and Littoral Drift: LITDRIFT User Guide. Danish Hydraulic Institute, Denmark, 108p.
- DHI (2007b) - LITPROF - Profile Development: LITPROF User Guide. Danish Hydraulic Institute, Denmark, 74p.
- Dias, J.M.A. & Taborda, R. (1988) - Evolução recente do nível médio do mar em Portugal. *Anais do Instituto Hidrográfico*, 9, 88-97.
- Dias, J.M.A. & Taborda, R. (1992) - Tidal gauge data in deducing secular trends of relative sea level and crustal movements in Portugal. *Journal of Coastal Research*, 8/3, 655-659.
- Donnelly, C., Ranasinghe, R. & Larson, M. (2005) - Numerical modelling of beach profile change caused by overwash. In: “Proceedings of Coastal Dynamics 2005”.
- EEA (2004) - Impacts of Europe’s Changing Climate: An Indicator-Based Assessment. EEA Rel. 2/2004, European Environment Agency, Copenhagen, 107 pp. Disponível em: http://reports.eea.europa.eu/climate_report_2_2004/en
- Elias, N.T.P. (1992) - Nova ponte do Tejo em Lisboa. Caracterização das condições hidrodinâmicas e de estabilidade dos canais. Rel. 212/92 – NET, LNEC, Lisboa, Portugal. (não publicado).
- Erosion (2004) - Living with Coastal Erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability. Part-1 Major Findings and Policy Recommendations of the EUROSION Project. Guidelines for implementing local information systems dedicated to coastal erosion management. In: “Coastal erosion – Evaluation of the need for action”, Directorate General Environment, European Commission, 54 pp. Disponível em: <http://www.erosion.org/reports-online/part1.pdf>
- Ferreira, Ó., Dias J.M.A. & Taborda, R. (2001) - Implications of sea-level rise for Portugal. *Journal of Coastal Research*. (em impressão)
- 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.
- Freire, P.M.S. (1999) - Evolução morfo-sedimentar de margens estuarinas (estuário do Tejo, Portugal). Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 320 p.
- GIOC (Grupo de Ingeneria Oceanográfica y de Costas de Universidad de Cantabria) (2000) - *Atlas de inundación del litoral peninsular español*. Universidad de Cantábrria, Santander.
- IM (1994) - Valores normais decenciais correspondentes ao período de 1961-1990 – região de Ribatejo e Oeste. Instituto de Meteorologia, Lisboa, Portugal. (não publicado).
- Gumbel, E.J. (1958) - *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, New York, 375 pp.
- King, C.A.M. (1975) - *Introduction to Marine Geology and Geomorphology*. Edward Arnold Publishers Lda, 309 p.
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W. Collins, P. Friedlingstein, A. Gaye, J. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti and Co-authors (2007) - Global climate projections. In: Solomon, S., Manning, D.Q.M., Chen, Z., Nicholls, R.J., P.P. Wong, V.R. Burkett, J.O. Codignotto, J.E. Hay, R.F. McLean, S. Ragoonaden and C.D. Woodroffe (2007) - Coastal systems and low-lying areas. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (eds.), “*Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*”, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315-356. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-chapter6.pdf>
- Oliveira, F.S.B.F. (2000) - Numerical simulation of wave propagation in the entrance of the Tagus estuary. In: Spaulding et al. (eds.), “*Estuarine and Coastal Modeling*”, VI, ASCE, 510-525.
- Oliveira, F.S.B.F. (2005) - Combined Wave and Tidal Effects on Sandy Beaches at a Short-Term Time Scale. In: “*Proceedings of the First International Conference on Coastal Conservation and Management in the Atlantic and Mediterranean*”, 455-467.
- Oliveira, F.S.B.F. & Vargas, C.I.C. (2007) - Evaluating the geomorphologic stability of an estuarine sandy beach. In: “*Proceedings of the International Symposium on Integrated Coastal Zone Management*”. 2007, Arental, Noruega. (aceite)

- Pethick, J. S. (1996) - The Geomorphology of Mudflats. In: Nordstrom, K., Roman, C. (eds.), "Estuarine Shores: Evolution, Environments, and Human Alterations". John Wiley & Sons, Chichester, 185-211.
- Rocha, J.S., Oliveira, A., Fernandes, J.N., Pinto, L. & Oliveira, F.S.B.F. (2007) - *Estudo hidráulico e hidrológico do concelho de Vila Franca de Xira. Carta de delimitação da zona de cheia*. Rel. 61/07 – NRE/NEC, LNEC, 80 p., Lisboa, Portugal. (confidencial).
- Różinski, G., Ostrowski, R., Pruszak, Z., Szmytkiewicz, M. & Skaja, M. (2006) - Data-driven analysis of joint coastal extremes near a large non-tidal estuary in North Europe. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68, 317-327.
- Santos, J.A., Capitão, R., Coli, A.B., Fortes, C.J. & Freire, P. (2006) - Previsão da agitação marítima no estuário do Tejo utilizando o modelo SWAN. In: APRH (ed.), "Proceedings do 8º Congresso da Água", Figueira da Foz, 13 a 17 de Março. Disponível em: <http://www.dha.lnec.pt/nec/portugues/estudos/berna/publicacoes/santos-et-al06.pdf>.
- Taborda, R. & Dias, J.M.A. (1992) - Análise da sobreelevação do nível do mar de origem meteorológica durante os temporais de Fevereiro/Março de 1978 e Dezembro de 1981. *Geonovas*, n.º 1, Especial Geologia e o Ambiente, 89-97.
- Valente, C., Freire, P.M.S. & Taborda, R. (2006) - Evolução morfológica da praia estuarina do Alfeite à Mesoescala. *VII Congresso Nacional de Geologia*. Portugal. Disponível em: <http://www.dha.lnec.pt/nec/portugues/estudos/berna/publicacoes/cgeologia06.pdf>.
- Vargas, C.I.C., Oliveira, F.S.B.F. & Carvalho, F. (2007) - Numerical study of a low energy beach morphodynamic. *Recursos Hídricos*. (em publicação)
- Viegas, T. (2005) - *Níveis de Inundação em Zonas Costeiras: Metodologia de Cálculo*. Relatório de estágio, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 120p.
- Zhang, Y., Baptista, A.M., Myers, E.P., (2004) - A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. Formulation and skill assessment. *Continental Shelf Research* 24 (18), 2187-2214.

