

# Vulnerabilidade à inundação da zona ribeirinha de Lisboa devido   subida do nível do mar como consequência das altera es climáticas

**Autores: M. Sousa (1), C. Antunes (2) e C. Catita (2)**

(1) Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa; fc45443@alunos.fc.u.pt

(2) IDL – Universidade de Lisboa

**Resumo:** São cada vez mais frequentes os registos de eventos extremos como consequência das altera es climáticas. A subida do NMM   um dos exemplos mais relevantes deste tipo de eventos. Devido   elevada inércia dos oceanos e ao aquecimento global, a subida do NMM continuará a ocorrer a um ritmo considerável, colocando as cidades costeiras em risco. Este estudo avalia a vulnerabilidade da zona ribeirinha da cidade de Lisboa a inunda es provocadas pela subida do nível do mar, considerando a variedade da maré, a sobreleva o meteorológica e o efeito de *setup* das ondas e do vento. Usando dados do marégrafo de Lisboa e tomando como referência a subida do NMM em Cascais, pretende-se obter uma cartografia de vulnerabilidade de inunda o considerando diferentes cenários para diferentes períodos de retorno e respetivo uso e ocupa o do solo. Neste trabalho, ainda preliminar, são apresentadas as zonas mais vulneráveis às inunda es extremas relativamente a níveis máximos de maré e a percentagens anuais de submersão.

**Palavras-chave:** nível médio do mar, sobreleva o meteorológica, cartografia de vulnerabilidade, marégrafo de Lisboa, zonas inundadas.

## 1. INTRODU O

As altera es climáticas e a ocorrência de eventos extremos que confirmam estas mesmas altera es são cada vez mais evidentes. Estes eventos irão ocorrer cada vez com maior frequência e maior intensidade (IPCC, 2013). A subida do nível médio do mar (NMM)   uma das consequências mais evidentes que está associada às altera es climáticas (IPCC, 2013). A subida do NMM   um fen meno, que ao contrário de outros eventos, como chuvas intensas ou tornados, não tem consequências imediatas mas a médio e longo prazo, de forma permanente, e com consequências graves para as zonas costeiras de baixa eleva o, caso não sejam tomadas medidas de preven o e adapta o atempadas.

As áreas urbanas, de uma forma geral apresentam grande parte da popula o, tanto em Portugal, como na maior parte do mundo e, estão localizadas maioritariamente no litoral do país. Nestas zonas costeiras são também onde se encontram muitos dos serviços, equipamentos e infraestruturas que contribuem para o desenvolvimento econ mico, com peso significativo na economia nacional. A subida do NMM aumenta o risco de erosão costeira, de inunda o e galgamento, com a consequente e potencial destrui o dessas infraestruturas provocando elevados impactos econ micos.

Todas estas altera es são já uma realidade em algumas partes do mundo e, em Portugal eventos como os que ocorreram nos invernos de 2010, 2013 e 2014 são cada vez mais frequentes e,

consequentemente, com períodos de retorno mais pequenos (IPCC, 2013).

Atualmente, dispomos de uma quantidade significativa de meios tecnológicos que permitem a observa o e registo da maior parte das altera es ambientais e climáticas, nomeadamente, varia es do nível do mar e todos os fen menos a ele associados. Deste modo   possível perceber a evolu o destas altera es, possibilitando assim a previsão para apoio   tomada de decisão, de modo a prevenir maiores impactos para a popula o, infraestruturas e equipamentos essenciais para funcionamento destas áreas vulneráveis e, respetivo desenvolvimento econ mico e humano.

Neste contexto   de extrema importância a avalia o da vulnerabilidade das zonas costeiras, em especial, das zonas ribeirinhas de cidades como Lisboa, com forte exposi o ao risco de subida do nível do mar.

Este trabalho parte da análise espacial de extremos de inunda o sobre o modelo digital de superfície (MDS) com resolu o de 1 m. O MDS resulta da integra o de dados lidar com modelo digital terrestre (MDT).

## 2. NÍVEL MÉDIO DO MAR E SOBREELEVA O METEOROLÓGICA

Atualmente, recorrendo aos dados disponíveis dos vários marégrafos da costa Portuguesa   possível monitorizar e determinar com precisão a varia o do nível do mar, tanto ao nível da subida do NMM como ao nível dos fatores de forçamento meteorológico. Consequentemente, avaliar o

impacto destas variações sobre as cidades e populações mais expostas.

O aumento do NMM na costa portuguesa, segundo os estudos mais recentes (Antunes, 2011; Antunes, 2014) já ultrapassou a taxa verificada no final do século passado, de 2,1 mm/ano, podendo situar-se atualmente na ordem de 4 mm/ano. Esta variação corresponde a uma duplicação da taxa em 15 anos, o que a longo prazo poderá resultar em impactos significativos resultando em danos irreparáveis, como o desaparecimento de ilhas, o recuo significativo da linha de costa em zonas continentais e insulares, bem como, a inundação das zonas de reduzida elevação em cidades costeiras com as consequentes implicações de adaptação e recuo do tecido urbano.

Outro fator a ter em conta é a variabilidade do nível do mar, à parte da maré astronómica que é conhecida e regular, relativo a variações periódicas de curto, médio e longo período. Existem outros fatores de forçamento meteorológico que podem projetar o nível do mar para valores muito superiores à previsão da maré astronómica com consequências extremas (Taborda e Dias, 1992). Estas variações resultam de um forçamento atmosférico associado à passagem de sistemas depressionários e ventos fortes, que quando em conjugação provocada pela passagem de tempestades, resultam na sobre-elevação meteorológica (SM) do nível do mar, e ainda no efeito de *setup* do vento (efeito de empilhamento junto à margem).

Em zonas ribeirinhas e de baixa elevação todos estes fenómenos têm igualmente influência, embora com impactos distintos. Já os fenómenos de forçamento de ventos locais ou agitação marítima são mais atenuados nas águas interiores de zonas estuarinas devido à sua natural proteção; ainda assim, não estão completamente isentas destas condicionantes, uma vez que pode existir alguma agitação, embora ligeira, e *setup* de vento.

No caso específico deste estudo, à parte da subida do NMM que acontece em todas as zonas marítimas sensivelmente de igual forma, sofre também influência de *setup* de vento vindo dos quadrantes sul, sendo necessários a sua consideração. Dada a ausência de estudos publicados para a zona ribeirinha de Lisboa, decidiu-se assumir valores pequenos de 15 a 20 cm de *setup* de vento baseado na perceção empírica.

### 3. METODOLOGIA

Neste trabalho, foram analisados os valores horários registados pelo marégrafo de Lisboa, com localização no Cais do Terreiro do Paço, entre os anos de 1973 e 2009, adquiridos pelo Instituto Hidrográfico. Neste período existem anos para os quais não há dados disponíveis, contudo foi possível fazer uma avaliação do regime de sobre-elevação meteorológicas, recorrendo à análise harmónica

anual, através do método de ajustamento de mínimos quadrados (MMQ), aplicando a metodologia descrita em Antunes e Godinho (2011). Desta forma, obtiveram-se, através dos resíduos do ajustamento dos dados horários, os valores de SM ocorridos em cada ano. Com a análise de extremos das séries anuais de SM foram estimados os períodos de retorno da amplitude de eventos extremos de SM de acordo com a metodologia de Vieira *et al.* (2012).

Tomando como referência a maré astronómica de 2010, foi calculada uma curva de frequência do nível de maré baseado numa amostragem de alturas de maré de 3 minutos. A razão de se tomar 2010 como referência, prende-se com o fato de ter sido um ano de marés equinociais máximas, de forma a definir um cenário de maré máximo que se verifica a cada 4 a 5 anos (ciclos quatri-nodais) devido às variações dos parâmetros orbitais da Lua. Aos valores de altura de maré foi retirado o respetivo valor de referência do Zero Hidrográfico (ZH), de forma a obterem-se elevações do nível de maré relativas à referência geodésica vertical, o *Datum* de Cascais de 1938.

Posteriormente, tendo como fundamento os valores de projeção de subida do NMM (Antunes, 2011), foram calculados os percentis de submersão para os três períodos dos cenários em estudo, 2025, 2050 e 2100. Sobre estas curvas de referência das frequências de submersão do nível do mar projetado, são adicionados as SM para dois períodos de retorno, acrescidas ainda, de valores empíricos de *setup* local resultante do forçamento do vento.

Nas duas figuras que se seguem (Fig. 1 e Fig. 2) são apresentadas as percentagens de submersão, para cinco cenários relativos aos anos de 2050 e 2100. Em cada figura estão representados as percentagens de submersão para o valor de referência do NMM, para os períodos de retorno de SM considerados, com e sem influência de *setup* local de vento.

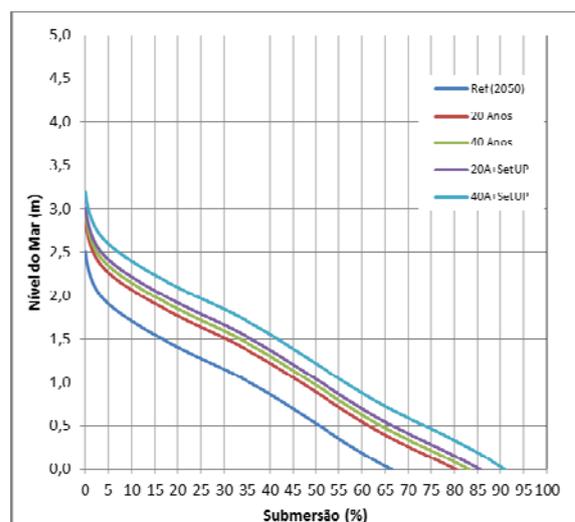


Fig. 1. Curvas de percentil com valores de percentagem de submersão de referência projetado para o NMM de 2050, para períodos de retorno de SM de 20 e 40 anos, e para os mesmos períodos de retorno conjugados com efeito de *setup* de vento. Alturas referidas ao datum vertical de Cascais de 1938.

Através dos modelos de frequência apresentados nas figuras 1 e 2 é possível extrair as cotas de inundação (Tabela I, II e III) para os vários cenários considerados.

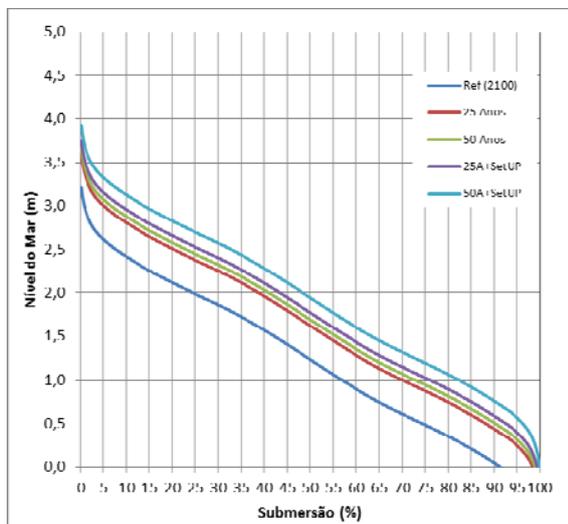


Fig. 2. Curvas de percentil com valores de percentagem de submersão projetado para o NMM de 2100, para perodos de retorno de SM de 25 e 50 anos, e para os mesmos perodos de retorno conjugados com efeito de setup de vento. Alturas referidas ao datum vertical de Cascais de 1938.

Os cenários em análise foram definidos com uma letra maiúscula (A, B e C) que define o ano de cenário projetado (2025, 2050 e 2100), um número de ordem e uma letra minúscula (a e b) designando os fatores forçadores.

Assim, os cenários definidos são:

- A1a – NMM em 2025, com maré e perodo de retorno de SM a 10 anos
- A1b – A1a com SetUp de ondas e vento
- A2a – NMM em 2025, com maré e perodo de retorno de SM a 20 anos
- A2b – A2a com SetUp de ondas e vento
- B3a – NMM em 2050, com maré e perodo de retorno de SM a 20 anos
- B3b – B3a com SetUp de ondas e vento
- B4a – NMM em 2050, com maré e perodo de retorno de SM a 40 anos
- B4b – B4a com SetUp de ondas e vento
- C5a – NMM em 2100, com maré e perodo de retorno de SM a 25 anos
- C5b – C5a com SetUp de ondas e vento
- C6a – NMM em 2100, com maré e perodo de retorno de SM a 50 anos
- C6b – C6a com SetUp de ondas e vento

A partir das curvas de percentil de submersão anual são extraídas as cotas de inunda o para os cenários de níveis máximos, correspondentes a 0,25% (máxima preia-mar), 5% (preia-mar de águas vivas) e 10% (preia-mar média), reproduzidos nas Tabelas I, II e III.

Tabela I. Valor das cotas de inunda o para uma taxa de 0,25% de submersão (preia-mar máxima).

TABELA DE 0,25% SUBMERSÃO (Preia-Mar Máxima)									
A (2025)			B (2050)			C (2100)			
Ref	1 (10 anos)	2 (25 anos)	Ref	3 (20 anos)	4 (40 anos)	Ref	5 (25 anos)	6 (50 anos)	
a	2,24	2,5	2,6	2,45	2,8	2,9	3,16	3,6	3,6
b		2,7	2,9		3,0	3,1		3,7	3,9

Tabela II. Valor das cotas de inunda o para uma taxa de 5% de submersão (preia-mar de águas vivas).

TABELA DE 5% SUBMERSÃO (Preia-Mar de �guas-Vivas)									
A (2025)			B (2050)			C (2100)			
Ref	1 (10 anos)	2 (25 anos)	Ref	3 (20 anos)	4 (40 anos)	Ref	5 (25 anos)	6 (50 anos)	
a	1,70	2,0	2,1	1,91	2,3	2,4	2,62	3,0	3,1
b		2,1	2,3		2,4	2,6		3,2	3,3

Tabela III. Valor das cotas de inunda o para uma taxa de 10% de submersão (preia-mar média).

TABELA DE 10% SUBMERSÃO (Preia-Mar Média)									
A (2025)			B (2050)			C (2100)			
Ref	1 (10 anos)	2 (25 anos)	Ref	3 (20 anos)	4 (40 anos)	Ref	5 (25 anos)	6 (50 anos)	
a	1,50	1,8	1,9	1,71	2,1	2,2	2,42	2,8	2,9
b		1,9	2,1		2,2	2,4		3,0	3,1

#### 4. RESULTADOS

Neste trabalho pretende-se compreender quais as consequências com as altera es do NMM e SM, tal como a localiza o das zonas afetadas. A partir de máximos de inunda o estimados para cada cenário   feita uma intersec o com o MDS com o qual se obt m a área inundada.

Embora neste trabalho se pretenda avaliar a vulnerabilidade desta zona às condi es de forçamento do mar de origem climática e climatológica, até ao presente apenas foi possível identificar as zonas da cidade de Lisboa que serão afetadas para cada cenário e para cada percentagem temporal de submersão.

Para o estudo de vulnerabilidade foi considerada informa o relativa aos transportes públicos, como rede ferroviária, linhas do metro, linhas de elétrico e a localiza o de esta es de transportes públicos, tal como o edificado, rede viária e infraestruturas subterrâneas, como estacionamento ou esta es de metro.

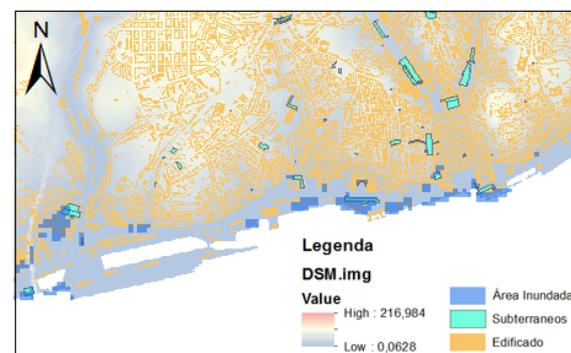


Fig. 3.  rea inundada para o cenário A2a.

Desta forma foi então possível obter várias áreas de inunda o, como demonstram as figuras 3, 4 e 5. No primeiro caso (Figura 3) o cenário representado,

A2a, é relativo a um nível de submersão de 0,25% numa praia-mar máxima para o ano de 2025 e com um período de retorno de SM de 25 anos sem qualquer influência de *setup* de vento. Este caso corresponde a um cenário de um futuro próximo que nos mostra que já nesta situação existem algumas infraestruturas públicas que possivelmente serão parcialmente afetadas. Tanto a estação ferroviária do Cais do Sodré como a estação do Terreiro do Paço serão afetadas por inundações esporádicas que poderão ocorrer em 0,25% do ano, correspondendo a algumas horas nos períodos de preia-mar de máximas marés vivas equinociais.

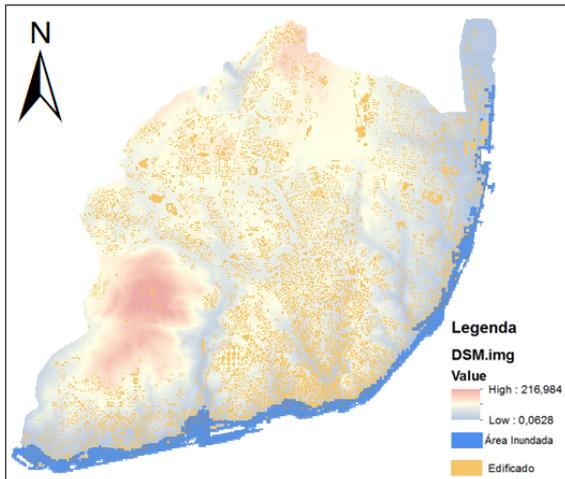


Fig. 4. Área inundada para o cenário C6b.

No caso de ocorrência do pior cenário previsto, C6b, representados na Figura 4, corresponde a um nível de submersão anual de 0,25%, numa praia-mar máxima para o ano de 2100, com um período de retorno de SM de 50 anos e com *setup* de vento. Este cenário, sendo ele o mais grave, revela uma extensa área vulnerável e exposta a inundações esporádicas.

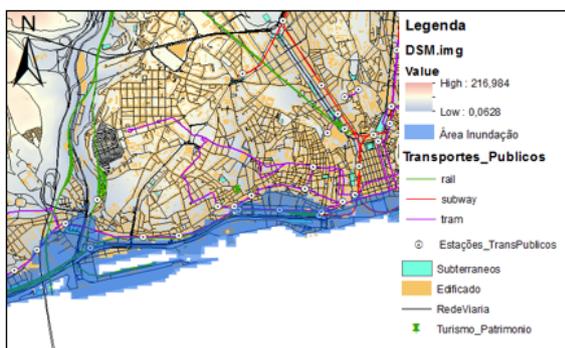


Fig. 5. Pormenor da área inundada como consequência do cenário C6b. Nesta figura está representado os locais mais críticos da subida do NMM que se localizam entre a Baixa-Chiado, cais do Sodré e Santos.

No pormenor do cenário C6b (Fig.5), verifica-se igualmente que a área mais suscetível é entre a Baixa-Chiado e Santos, e de Alcântara a Belém. Neste cenário, apresenta-se uma situação com um número muito mais elevado de infraestruturas afetadas.

## 5. CONCLUSÕES

Da análise feita aos resultados até agora obtidos, confirma-se que a subida do NMM, com forte probabilidade de ser causada pelas alterações climáticas e que poderão agravar-se nos próximos anos, com grande impacto na subida do NMM, mostra-se a vasta área que pode ser colocada em risco. Uma grande área urbana onde existem infraestruturas relevantes e de interesse público afetando, deste modo, diretamente a vida da população e a atividade económica da cidade, nomeadamente o turismo.

Um fator que influencia os resultados obtidos na avaliação de vulnerabilidade é a qualidade da informação geográfica, principalmente a informação relativa à georreferenciação das infraestruturas de transportes públicos, devido à origem e à falta de rigor da fonte de dados. Este trabalho encontra-se presentemente em desenvolvimento, esperando-se em breve, resultados mais definitivos e com uma real avaliação da vulnerabilidade da zona ribeirinha de Lisboa.

### Agradecimentos

À Câmara Municipal de Lisboa pela disponibilidade dos dados referentes ao levantamento Lidar da cidade de Lisboa para a criação do Modelo Digital de Superfície (MDS).

## REFERÊNCIAS

- Antunes, C. e Godinho, J.M. (2011). Estudo da análise harmónica da maré aplicada ao marégrafo de Cascais. *Actas da VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia - CNCG2011*, 357-365.
- Antunes, C. (2011). Variação actual do NMM em Cascais. *Actas da VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia - CNCG2011*, 366-373.
- Antunes, C. (2014). Eventos Extremos e a Variação do Nível do Mar. *3ª Jornadas de Engenharia Hidrográfica*.
- Taborda, R., e Dias, J. A. (1992). Análise da Sobreelevação do Mar de Origem Meteorológica durante os Temporais de Fevereiro/Março de 1978 e Dezembro de 1981. *Geonovas*, Nº 1 “*A Geologia e o Ambiente*”, 89-97.
- Vieira, R., Antunes, C., Taborda, R. (2012). Caracterização da sobreelevação meteorológica em Cascais nos Últimos 50 anos. *2ª Jornadas de Engenharia Hidrográfica*.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1535 pp, doi: 10.1017/CB09781107415324.