

Estudo da vulnerabilidade costeira à subida do nível médio do mar para Portugal Continental como consequência das alterações climáticas

C. Rocha (1,2), C. Antunes (2) e C. Catita (1,2)

(1) Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. carolina.silrocha@gmail.com.

(2) Instituto Dom Luiz, FCUL – Universidade de Lisboa.

Resumo: Portugal Continental possui aproximadamente 75% da sua população na zona costeira, assim como diversas infraestruturas de grande importância económica, às quais estão sujeitas aos riscos associados à subida do nível médio do mar (sNMM). Este trabalho constitui um contributo para a implementação da Diretiva Europeia 2007/60/CE que exige a cada estado membro a avaliação da vulnerabilidade, fundamental para as estratégias de adaptação às alterações climáticas, associada à sNMM e às inundações causadas pela ocorrência de eventos extremos. Desta forma, foi avaliada para 2050 e 2100 com diferentes cenários de sNMM e diferentes períodos de retorno de eventos extremos, a área de terreno em Portugal Continental afetada pela sNMM, para a qual foi produzida uma cartografia de vulnerabilidade física costeira. Os resultados deste estudo são disponibilizados através de um Web Map Service (WMS) para entidades públicas portuguesas, no âmbito de protocolos estabelecidos com Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Palavras-chave: Diretiva Europeia 2007/60/CE, subida do nível médio do mar, vulnerabilidade costeira, sistemas de informação geográfica, WMS.

1. INTRODUÇÃO

Considerando que vivem atualmente em Portugal milhares de pessoas em zonas costeiras com risco potencial de serem afetadas pela subida do nível médio do mar (sNMM), bem como, a existência de infraestruturas de elevada importância económica, sejam elas de transportes, de administração pública e serviços, de turismo, ou de outra qualquer atividade, o risco associado à sNMM aumentará progressivamente no futuro, à medida da taxa de subida e ao aumento da exposição ao risco. A avaliação da vulnerabilidade à sNMM das zonas urbanas costeiras é de crucial importância para a adoção de medidas e estratégias de adaptação às alterações climáticas.

O cumprimento dos requisitos impostos pela Diretiva Comunitária 2007/60/CE, transposta para a lei nacional através do Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de outubro, obriga as instituições nacionais a elaborar a cartografia de risco, identificando, numa primeira fase as zonas de maior vulnerabilidade, e numa segunda fase, a execução da respetiva cartografia de risco com o máximo rigor posicional. As zonas costeiras do território continental nacional são assim identificadas pelos autores deste estudo.

A metodologia apresentada, baseia-se na tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), possibilitando a elaboração da cartografia de vulnerabilidade face aos cenários de sNMM projetados para a costa portuguesa e para os horizontes temporais de 2050 e 2100.

2. METODOLOGIA

O processo metodológico aplicado encontra-se esquematizado na Fig. 1. Numa primeira etapa fez-se a recolha e organização de toda a informação necessária à construção do modelo proposto. Essa informação, foi obtida maioritariamente, em fontes de domínio público e da informação oficial e não oficial disponibilizada pelos diversos organismos nacionais (APA, DGT e IH).

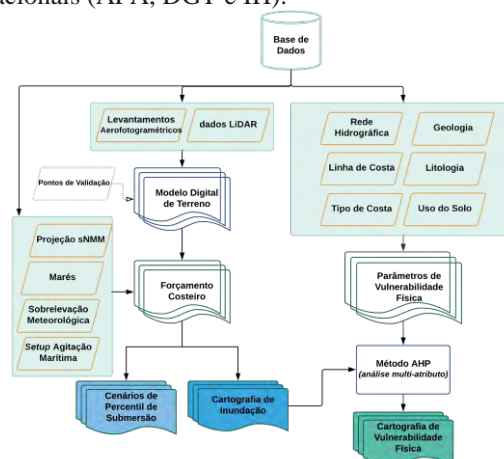


Fig. 1. Fluxo de processo da metodologia para a obtenção da cartografia de vulnerabilidade costeira em Portugal Continental.

2.1. Cenários de extremos do Nível do Mar

Os diferentes cenários de sNMM para 2050 e 2100 com diferentes períodos de retorno de eventos extremos foram calculados com base na informação dos marégrafos de Leixões, Cascais, Lisboa e Lagos. Assim, foi possível dividir e caracterizar o território

em quatro zonas: Norte, Centro, Alentejo e Algarve, respetivamente. Com exceção dos dados do marégrafo de Cascais, os valores para Leixões, Lisboa e Lagos resultam de séries de dados mais curtas e incompletas com dados entre 1970 e 2010. Os registos de valores extremos de sobrelevação meteorológica (SM) foram caracterizados, em termos de frequência e amplitude, através de uma análise de extremos seguindo a metodologia apresentada em Vieira *et al.* (2012). Com esta análise obtiveram-se curvas de períodos de retorno para cada porto maregráfico.

Considerando os valores de projeção de sNMM de Antunes (2016), foram ainda calculados os percentis de submersão de maré para os dois períodos dos cenários em estudo, 2050 e 2100, adicionando-se os valores respetivos de projeção do NMM. Sobre estas curvas de referência das frequências de submersão do nível do mar projetado, foi adicionada a SM para dois períodos de retorno (1):

$$\text{Nível Extremo} = \text{Maré} + \text{SM} + \text{sNMM} \quad (1)$$

A partir das curvas de percentil de submersão anual resultantes (Fig. 2) são extraídas as cotas para cada cenário de inundação para níveis extremos, correspondentes ao percentil de 0.25% (máxima preia-mar).

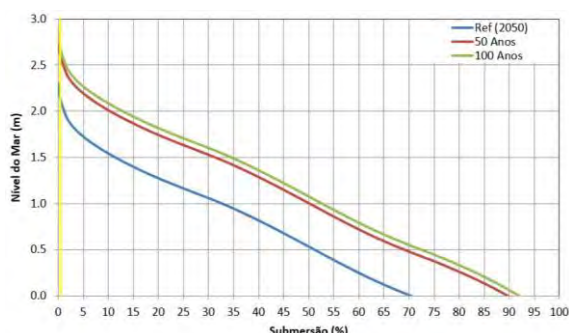


Fig. 2. Curvas de percentil de submersão para o NMM em 2050. linha amarela intersecta as 3 curvas de percentil para o valor 0.25% de submersão, partindo da maré de 2015.

De modo a incorporar os cenários de sNMM e a sua incerteza no índice de vulnerabilidade foi calculado, com recurso a um Modelo Digital de Terreno (MDT) de 20 m de resolução espacial, o nível de inundação em cada ponto, isto é, a altura de coluna de água da zona inundada. O índice de perigosidade de inundação (IPI), de 1 a 5, é então calculado considerando a incerteza dos modelos de frequência de submersão, que resultam da estimativa do desvio padrão dos níveis de maré, da SM e da sNMM:

$$\sigma_{\text{cenário}} = \sqrt{\sigma_{\text{maré}}^2 + \sigma_{\text{SM}}^2 + \sigma_{\text{sNMM}}^2} \quad (2)$$

O valor de incerteza de cada cenário depende assim do ano de projeção, obtiveram-se valores de desvio padrão para 2050 e 2100 de 12 cm e 40 cm, respetivamente.

Com base nas incertezas estimadas por (2) é calculada a curva padrão de distribuição Normal (Fig. 3), a partir da qual se determina a

probabilidade de inundação. Dividindo o domínio de probabilidade em cinco níveis obtêm-se os IPI, de 1 (menor probabilidade, de 0 a 20%) a 5 (máxima probabilidade, de 80 a 100%), relativos ao forçamento costeiro de inundação (Tabela I).

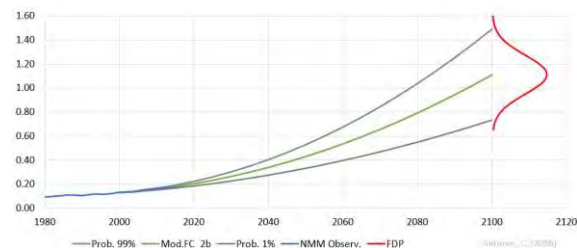


Fig. 3. Modelo de projeção do NMM relativo, Mod.FC_2 (modelo 2 da FCUL), baseado na análise dos dados do marégrafo de Cascais, de 1992 a 2016 (Antunes, 2016).

A Fig. 3 mostra a distribuição de probabilidade condicional de inundação centrada no valor de cota de um perfil topográfico, na qual se pode verificar que mesmo em zonas de cota superior ao nível determinístico de inundação, existe uma probabilidade de inundação, devido à incerteza dos parâmetros usados para a estimar. Quanto mais precisos forem os dados e os modelos, menor área sobrelevada será classificada com perigosidade.

Tabela I. Classificação do parâmetro "Forçamento Costeiro" no Índice de Perigosidade de Inundação, com base na probabilidade de cada cenário de inundação.

Índice de Perigosidade	Muito Baixo 1	Baixo 2	Moderado 3	Alto 4	Extremo 5
Forçamento Costeiro	≤ 20%	20% - 40%	40% - 60%	60% - 80%	≥ 80%

2.2. Parâmetros físicos de Vulnerabilidade

A escolha dos parâmetros de vulnerabilidade pode ser complexa e depende muito da análise que se pretenda realizar. Para este trabalho foram selecionados seis parâmetros físicos de vulnerabilidade, para serem avaliados e classificados individualmente. Cada um dos fatores foi classificado numa escala de 1 a 5, de modo a expressar o seu contributo para a vulnerabilidade costeira, sendo 5 o nível mais alto e 1 o mais baixo. A Tabela II apresenta a classificação de vulnerabilidade dos parâmetros físicos selecionados. Em Rocha (2016), descreve-se com maior detalhe os critérios de escolha dos parâmetros de vulnerabilidade utilizados.

Tabela II. Classificação dos parâmetros físicos de vulnerabilidade para Portugal Continental.

		1 - Muito Baixo	2 - Baixo	3 - Moderado	4 - Alto	5 - Extremo
Rede hidrográfica	Distância à rede	200 m - 300 m	150 m - 200 m	100 m - 150 m	50 m - 100 m	≤ 50 m
	Declive do Terreno	≥ 3°	2.0° - 3.0°	1.5° - 2.0°	0.5° - 1.0°	≤ 0.5°
Tipo de costa		Costa de arriba		Costa baixa e arenosa		
Distância à linha de costa		≥ 1000 m	200 m - 1000 m	50 m - 200 m	20 m - 50 m	≤ 20 m
Geologia		Rochas Eruptivas Plutónicas e Vulcânicas		Formação Sedimentares e Metamórficas		Formação Sedimentares
Litologia		urbano; rocha		pedra; argila		praias; depósitos; silvício; areia solta; cascalhos;
Uso do solo		corpos de água; escassa vegetação; plantano; rocha nua		areias costeiras; floresta		agricultura; infraestruturas urbanas e industriais

2.3. Processo de análise hierárquica (AHP)

Para a criação do Índice de Vulnerabilidade foi utilizado o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), desenvolvido por Thomas L. Saaty nos anos

70. Este método permite hierarquizar um conjunto de parâmetros avaliados em função de um conjunto de critérios. Como resultado, obtêm-se os pesos dos parâmetros usados na ordenação das alternativas a partir de uma matriz onde o decisor efetua comparações de relação de importância entre os critérios característicos das diferentes alternativas. Para cada parâmetro utilizado obtiveram-se os pesos apresentados em (3).

$$IVF_{ano} = \frac{IPI \times 34\% + RH \times 21\% + TC \times 15\% + DLC \times 15\% + G \times 8\% + L \times 4\% + US \times 2\%}{100\%} \quad (3)$$

onde, **IPI** – Índice de Perigosidade de Inundação, **RH** – Rede Hidrográfica, **TC** – Tipo de Costa, **DLC** – Distância à Linha de Costa, **G** – Geologia, **L** – Litologia e **US** – Uso do Solo.

De realçar, que os resultados do método AHP dependem da perspectiva dos decisores relativamente à importância de cada critério utilizado.

3. RESULTADOS

3.1. Cartografia de Inundação e Vulnerabilidade

De acordo com a metodologia apresentada anteriormente, foram determinadas as cotas mínimas e máximas de cada intervalo de probabilidade correspondente aos cinco níveis de perigosidade de inundação (Tabela III), depois utilizados para a construção dos cenários de inundação e, a partir deste, construir o modelo de vulnerabilidade física costeira.

Tabela III. Intervalos de cotas de inundação de cada nível de IPI e respetiva probabilidade de ocorrência para o cenário de subida do NMM, para 2050 e 2100.

Probabilidade de Ocorrência	2050, PR100, M+SM+sNMM				2100, PR100, M+SM+sNMM			
	Norte e Centro Ref=2.8 m		Alentejo e Algarve Ref=2.7 m		Norte e Centro Ref=3.5 m		Alentejo e Algarve Ref=3.4 m	
	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
0.25% a 20%	2.90	3.25	2.80	3.15	3.55	4.85	3.85	4.75
20% a 40%	2.80	2.90	2.70	2.80	3.60	3.95	3.50	3.85
40% a 60%	2.75	2.80	2.65	2.70	3.35	3.60	3.25	3.50
60% a 80%	2.65	2.75	2.55	2.65	3.00	3.35	2.90	3.25
80% a 95%	0.00	2.65	0.00	2.55	0.00	3.00	0.00	2.90
Incerteza do cenário	12 cm				40 cm			

A avaliação dos cenários de inundação centrou-se na determinação das áreas com probabilidade de inundação para os dois cenários de sNMM e, com base nos cenários de vulnerabilidade e na informação existente dos Censos2011, estimaram-se o número de alojamentos e residentes existentes nas áreas consideradas como vulneráveis.

1. Para 2050, estimou-se 903.2 km² de área suscetível de ser inundada devido à sNMM, sendo Lisboa o distrito que apresenta uma maior área com probabilidade de inundação com 221.4 km². Ao nível da vulnerabilidade física, o distrito de Lisboa apresenta a maior área de vulnerabilidade física, com cerca de 221.4 km², onde 92.7% é classificada como vulnerabilidade alta e extrema, tendo ainda 15499 alojamentos e 24682 residentes nas áreas vulneráveis (Tabela IV).

2. Em 2100 estima-se 1146 km² de área, aproximadamente, com probabilidade de inundação, sendo que 74.6% dessa área é classificada no nível extremo. O distrito de Lisboa será novamente o mais afetado com 249.6 km² (Fig. 4).

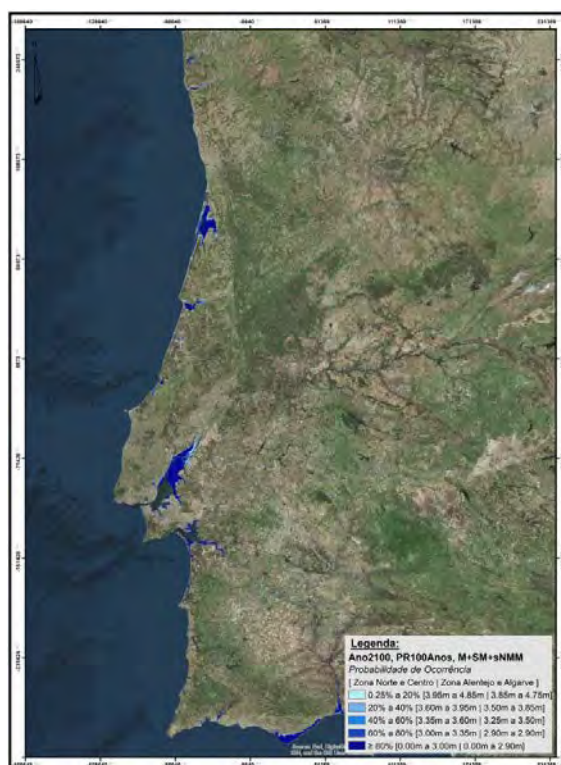


Fig. 4. Probabilidade de ocorrência para o cenário de subida do NMM para o ano de 2100 de nível extremo de maré mais sobrelevação meteorológica com período de retorno de 100 anos.

Lisboa, é novamente o distrito que apresenta uma área maior de vulnerabilidade física, com cerca de 249.6 km² e, terá 17472 alojamentos e 27824 residentes afetados pela sNMM (Fig. 5 e Tabela V).

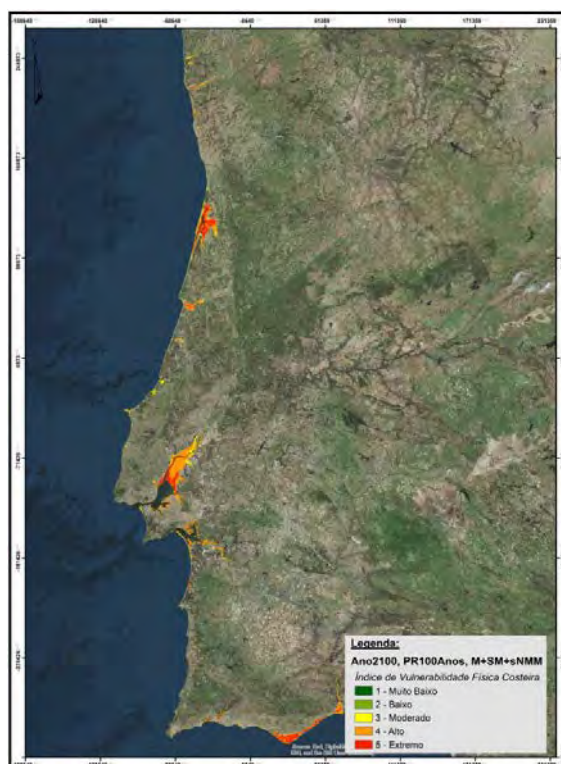


Fig. 5. Cenário de Vulnerabilidade Física Costeira para o ano de 2100 de nível extremo de maré mais sobrelevação meteorológica com período de retorno de 100 anos.

3.3. Aplicação WEB

Com o objetivo de partilhar os resultados deste estudo com o público, foi criada uma aplicação Web, alojada no portal SMARTCAMPUS da FCUL e que recorre à tecnologia ESRI® para a disponibilização de toda a cartografia produzida (Fig. 6).



Fig. 6. Página inicial da aplicação, disponível em: <https://smart.campus.ciencias.ulisboa.pt/portal/home/>.

Esta aplicação, interativa, permite ao utilizador consultar os resultados para a cartografia de inundação e de vulnerabilidade de forma comparativa entre os anos 2025, 2050 e 2100, bem como, obter mais informação relativa às tabelas aqui apresentadas (Tabela IV e Tabela V) para os horizontes de 2050 e 2100 (Fig. 7).

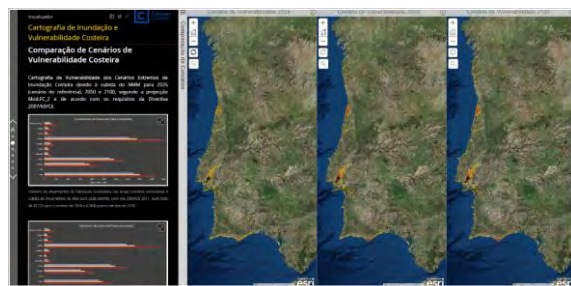


Fig. 7. Exemplo do que se pode consultar na aplicação Web.

Tabela IV. Áreas dos distritos para cada nível do índice de vulnerabilidade física costeira, bem como o número de alojamentos e residentes afetados, para o ano de 2050.

Distritos	Área (km ²)	Ano 2050, PR100Anos, M+SM+sNMM					TOTAL	Nº Alojamentos	Nº Residentes	
		1 - Muito Baixo	2 - Baixo	3 - Moderado	4 - Alto	5 - Extremo				
Faro	4996.80	0.06	2.75	11.95	65.24	102.34	183.16	3.67%	15966	15199
Beja	10263.32	0.01	0.18	1.83	4.36	0.21	5.79	0.06%	27	26
Setúbal	5214.06	0.05	4.78	17.45	93.88	20.65	182.71	3.50%	5663	8012
Lisboa	2816.14	0.01	0.53	15.61	151.78	53.47	166.48	5.91%	15499	24682
Santarém	6718.35	0.00	0.48	15.97	55.07	27.54	107.95	1.61%	668	1095
Leiria	3505.79	0.15	2.36	7.14	9.96	0.61	20.28	0.58%	734	539
Coimbra	3973.73	0.01	0.38	5.46	26.26	8.98	44.35	1.12%	1035	1199
Aveiro	2800.94	0.01	0.65	12.55	55.10	103.10	168.14	6.00%	15828	24081
Porto	2331.70	0.02	0.26	0.87	1.13	0.26	2.60	0.11%	609	1007
Braga	2706.11	0.00	0.06	0.71	1.82	1.13	3.89	0.14%	702	847
Viana do Castelo	2218.84	0.04	0.97	4.67	8.02	4.21	17.71	0.80%	1175	1548
Total	47545.77	0.35	13.40	94.22	472.61	322.47	903.06	1.90%	49225	63082

Tabela V. Áreas dos distritos para cada nível do índice de vulnerabilidade física costeira, bem como o número de alojamentos e residentes afetados, para o ano de 2100.

Distritos	Área (km ²)	Ano 2100, PR100Anos, M+SM+sNMM					TOTAL	Nº Alojamentos	Nº Residentes	
		1 - Muito Baixo	2 - Baixo	3 - Moderado	4 - Alto	5 - Extremo				
Faro	4996.80	0.11	6.60	22.03	75.98	106.14	211.78	4.24%	18463	17575
Beja	10263.32	0.01	0.42	2.17	4.48	0.21	6.39	0.06%	29	29
Setúbal	5214.06	0.36	11.02	27.66	111.02	24.08	223.86	4.29%	7208	10198
Lisboa	2816.14	0.04	1.81	16.02	174.92	56.79	189.39	6.73%	17472	27824
Santarém	6718.35	0.00	1.84	39.47	83.18	28.44	163.23	2.43%	1031	1690
Leiria	3505.79	0.38	4.92	13.86	14.07	0.82	34.15	0.97%	1235	908
Coimbra	3973.73	0.05	1.82	7.65	34.46	10.02	57.82	1.46%	1360	1575
Aveiro	2800.94	0.01	2.70	31.72	74.10	110.10	214.74	7.67%	20188	30715
Porto	2331.70	0.07	1.13	2.46	1.61	0.39	5.82	0.25%	1354	2237
Braga	2706.11	0.00	0.17	2.87	2.99	1.57	7.82	0.29%	1436	1732
Viana do Castelo	2218.84	0.18	3.29	9.96	12.43	5.22	30.72	1.38%	2037	2685
Total	47545.77	1.21	35.72	175.85	589.22	343.74	1145.73	2.41%	62453	80034

4. CONCLUSÕES

Como resultado deste estudo obtém-se, tanto para 2050 e 2100, uma área costeira com probabilidade de inundação de 903.2 km² e 1146 km², respetivamente. Se contabilizarmos as estimativas para a população residente e os alojamentos, demonstra-se que a avaliação da vulnerabilidade e risco à sNMM e dos eventos extremos de reforçamento meteorológico são fundamentais para uma boa e adequada gestão do território no âmbito das medidas de adaptação às alterações climáticas.

O conhecimento antecipado da sNMM, através de modelos de projeção sucessiva e permanentemente atualizados com base nos dados mais recentes, possibilita um planeamento de adaptação antecipado e, conseqüentemente, uma otimização e redução dos custos associados a essa exposição, bem como, uma maior garantia de sustentabilidade económico-social.

REFERÊNCIAS

Antunes, C. (2016). Subida do Nível Médio do Mar em Cascais, revisão da taxa actual. *Atas das 4^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 163-166.

Rocha, C. (2016). *Estudo e análise da vulnerabilidade costeira face a cenários de subida do nível do mar e eventos extremos devido ao efeito das alterações climáticas*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 129 pp.

Vieira, R., Antunes, C. e Taborda, R. (2012). Caracterização da sobrelevação meteorológica em Cascais nos últimos 50 anos. *Atas das 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa 20-22 de junho, 175-178.