

# Estudo e Análise da Vulnerabilidade Costeira face a cenários de subida do nível médio do mar devido às alterações climáticas

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

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

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

**Resumo:** Portugal Continental tem uma costa densamente povoada, possuindo atividades com elevado valor económico e concentração de infraestruturas. A identificação das zonas costeiras vulneráveis a eventos extremos e à subida do nível do mar, com inundação total ou parcial, é fundamental para uma adequada gestão e avaliação de risco costeiro. Este estudo, em desenvolvimento, visa avaliar a vulnerabilidade costeira em Portugal Continental para 2025, 2050 e 2100 com diferentes cenários de subida do nível médio do mar e diferentes períodos de retorno de eventos extremos. Os dados usados contemplam informação dos marégrafos de Leixões, Cascais, Sines e Lagos, dados altimétricos de elevada precisão e resolução espacial e dados relativos à ocupação e uso do solo. Como resultado, pretende-se produzir uma cartografia temática de vulnerabilidade de inundação ao longo da costa, obter uma estimativa rigorosa da área de terreno afetada pelo avanço do mar e o recuo da linha de costa face aos cenários considerados.

**Palavras-chave:** vulnerabilidade costeira, subida do nível médio do mar, sobre-elevação meteorológica, galgamento, recuo da linha de costa.

## 1. INTRODUÇÃO

A zona costeira de Portugal Continental é amplamente reconhecida por ter um valor natural, económico e cultural ímpar. No entanto, a diversidade de atividades que esta suporta induz, frequentemente, a conflitos de interesses conduzindo a estratégias de intervenção contraditórias e consequentes. Este facto tem conduzido, desde há décadas, à degradação do sistema costeiro, em grande parte devido aos problemas relacionados com a erosão costeira e redução da alimentação sedimentar (Santos *et al.*, 2014). Controlar e inverter o problema não será uma tarefa fácil uma vez que a recuperação do litoral é um processo complexo e demorado. Esta recuperação e proteção, que deve ser encarada como um desígnio nacional, só poderá ser atingida com uma gestão baseada no conhecimento, identificando as causas, reconhecendo a respetiva dinâmica e intervindo a favor da natureza (Santos *et al.*, 2014).

A análise das vulnerabilidades de uma zona costeira e da sua evolução ao longo do tempo, em relação às ações energéticas do mar, é essencial em termos de ordenamento, uma vez que este é função dos valores humanos, económicos, ecológicos e culturais de cada zona (Coelho *et al.*, 2006).

A aplicação da metodologia proposta, recorrendo a técnicas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), possibilitará a elaboração de uma cartografia de vulnerabilidade ao longo de toda a linha de costa de Portugal Continental.

## 2. ANÁLISE DA VULNERABILIDADE COSTEIRA DE PORTUGAL CONTINENTAL

A vulnerabilidade das zonas costeiras às ações energéticas do mar pode ser entendida como a predisposição a um dado risco, englobando diversos elementos e conceitos, como a sensibilidade ou suscetibilidade ao dano e a falta de capacidade para se adaptar (IPCC, 2014).

A análise da vulnerabilidade do litoral de Portugal Continental aos cenários de subida do NMM requer a ponderação de diversos fatores, como por exemplo, a dinâmica do litoral e os respetivos processos de forçamento.

Para além de fenómenos extremos e de curta duração, existe na zona costeira uma dinâmica natural, frequentemente intensificada ou antecipada através de ações antropogénicas, que entra em conflito com as atividades e ocupação humana. Como resultado dessa dinâmica existe atualmente, em muitas zonas costeiras, uma situação generalizada de erosão e de recuo da linha de costa, com valores preocupantes a médio e a longo prazo (Coelho *et al.*, 2006).

É necessário referir que a análise de vulnerabilidade é feita ao longo de toda a costa continental, requerendo para tal informação adequada, tanto em qualidade como em quantidade, contendo diversas variáveis e fatores físicos. Fatores antropogénicos, de origem económica e ambiental, serão adicionados apenas em análises futuras a nível local em casos específicos de maior vulnerabilidade detetados nesta fase inicial.

## 2.1. Cenários de extremos do Nível do Mar

Os diferentes cenários de subida do NMM para 2025, 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, Sul 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 sobre-elevação meteorológica (SM) superiores a 10 cm foram caracterizados, em termos de frequência e amplitude, através de uma análise de extremos seguindo a metodologia apresentada em Vieira *et al.* (2012), com a qual se obtiveram curvas de períodos de retorno para cada porto maregráfico. Tomando como referência a maré astronómica de 2010, calculou-se a curva de frequência do nível de maré para as quatro regiões (incluindo Sines para a região sul). A escolha do ano de 2010, como referência, deve-se ao fato de as respetivas marés equinociais corresponderem a valores máximos, o que se verifica a cada 4 a 5 anos (ciclos quatri-nodais) devido às variações da órbita da Lua. Desta forma define-se assim como referência um cenário de extremo máximo de maré.

Aos valores de altura de maré das curvas de frequência foi retirado o respetivo valor de referência do Zero Hidrográfico (ZH), de forma a reduzir as elevações do nível de maré ao *datum* vertical cartográfico, o *Datum* de Cascais de 1938 e, desta forma, compatibilizar os níveis de maré com o sistema de altitude ortométricas do Modelo Digital de Terreno (MDT) usado no sistema de análise de vulnerabilidade.

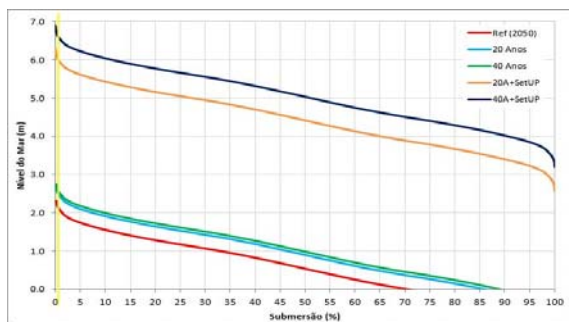


Fig. 1. Curvas de percentil de submersão para o NMM em 2050, para: a) Modelo de maré mais SM (20 e 40 anos); e, b) modelo de maré meteorológica mais setup de agitação marítima (20A+SetUp e 40A+SetUp). A linha amarela intersecta as 5 curvas de percentil para o valor 0.25% de submersão.

Baseado em valores de projeção de subida do NMM de Antunes (2011), foram calculados os percentis de submersão de maré para os três períodos dos cenários em estudo, 2025, 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, acrescida ainda de valores de *setup* de agitação marítima (dinâmico e estático).

A partir das curvas de percentil de submersão anual resultantes (Fig. 1) são extraídas as cotas para cada cenário de inundação para níveis extremos, correspondentes a 0.25% (máxima preia-mar), 5% (preia-mar de águas vivas) e 10% (preia-mar média). Porém, nesta comunicação serão apenas apresentados valores extremos de cota de inundação para 0.25% de submersão (Tabela I).

Tabela I. Tabela de 0.25% de submersão para as quatro zonas costeiras com diferentes períodos de retorno consoante para dois modelos de maré: a) modelo de maré mais SM; b) maré meteorológica mais setup de agitação marítima.

ZONA	Modelo de Maré	Ref	2025		2050		2100		
			Período de Retorno 10 anos	20 anos	Período de Retorno 20 anos	40 anos	Ref	Período de Retorno 25 anos	50 anos
NORTE	a	2.09	2.4	2.5	2.7	2.7	3.01	3.4	3.5
	b		5.9	6.5	6.2	6.8		7.0	7.6
CENTRO	a	2.00	2.3	2.4	2.6	2.7	2.92	3.3	3.4
	b		5.8	6.4	6.1	6.7		6.8	7.4
SUL	a	1.98	2.2	2.3	2.5	2.6	2.90	3.3	3.3
	b		5.1	5.9	5.4	6.1		6.2	6.8
ALGARVE	a	1.95	2.2	2.3	2.5	2.6	2.87	3.2	3.3
	b		5.1	5.8	5.4	6.1		6.1	6.8

De modo a incorporar os cenários de subida do NMM e sua incerteza no índice de vulnerabilidade foi calculado, com recurso a um MDT de 20 m de resolução espacial, o desnível de inundação em cada ponto, isto é, a altura de coluna de água da zona inundada (cota de inundação menos cota de terreno). Para calcular um índice, de 1 a 5, relativo à perigosidade da inundação, considera-se a incerteza dos modelos de frequência de submersão (Tabela II), resultante da estimativa do desvio padrão dos níveis máximos de maré, da subida do NMM e da SM

$$\sigma_{\text{cenário}} = \sqrt{\sigma_{\text{maré}}^2 + \sigma_{\text{NMM}}^2 + \sigma_{\text{SM}}^2} \quad (1)$$

em que cada valor de incerteza de cada cenário vai depender do ano de projeção.

Tabela II. Desvio padrão (em cm) de cada cenário de projeção, tendo em conta as três componentes que compõem o cenário de inundação: a) maré; b) subida do nível médio do mar; c) sobre-elevação meteorológica

ANO DE PROJEÇÃO	$\sigma_{\text{maré}}$	$\sigma_{\text{NMM}}$	$\sigma_{\text{SM}}$	$\sigma_{\text{cenário}}$
2025	5	3	5	8
2050	5	7	9	12
2100	5	36	15	40

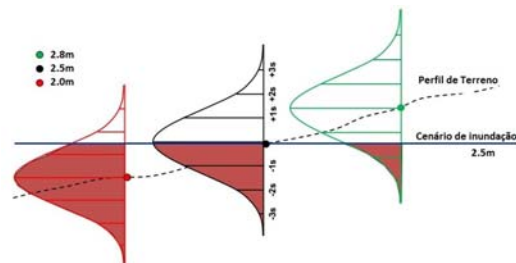


Fig. 2. Método de cálculo da probabilidade de inundação de um dado local (2.0m, 2.5m e 2.8m de cota), com base na cota máxima de maré sobre-elevada ( $h = 2.5m$ ) e da sua incerteza (adaptado de Marcy *et al.*, 2011).

Com base nas incertezas estimadas por (1) são calculadas curva padrão de distribuição Normal (Fig.

2), a partir da qual se podem determinar índices de vulnerabilidade, de 1 (menor probabilidade) a 5 (máxima probabilidade), do forçamento costeiro.

## 2.2. Parâmetros 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 sete parâmetros de vulnerabilidade, para serem avaliados e classificados individualmente. Cada um dos fatores será 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. Na Tabela III é apresentada a classificação de vulnerabilidade dos parâmetros físicos selecionados. Até à data ainda não se possui uma rede hidrográfica consistente e devidamente classificada, de modo a considerar a sua influência na vulnerabilidade de forçamento costeiro.

O tipo de linha de costa em Portugal Continental, apresenta um traçado bastante regular, mas é variável de acordo com a natureza dos materiais rochosos que a constituem e, embora o litoral Português seja dominado essencialmente por praias, existem áreas de costa predominantemente rochosa. Assim pode-se definir dois tipos de costa, a costa de arriba e a costa baixa e arenosa. São estes os dois fatores considerados para o índice de vulnerabilidade.

A distância à linha de costa é um fator importante nesta análise, uma vez que a vulnerabilidade aumenta com a proximidade à zona de interação com o mar. Uma vez que são considerados dois modelos de máximo de maré: o modelo de maré mais SM e o modelo de maré meteorológica mais *setup* de agitação marítima, o fator de distância à linha de costa não é utilizado de igual forma quando se considera o efeito de galgamento resultante da agitação marítima extrema.

A cartografia da Geologia Sólida e da Deriva Geológica permite avaliar a natureza das rochas e dos sedimentos que constituem a região costeira, e fazer uma classificação baseada no comportamento desses materiais quando sujeitos a ação de forçamento do mar. Por exemplo, as rochas magmáticas ou eruptivas são rochas de elevada dureza e por isso de reduzida vulnerabilidade, ao contrario dos sedimentos não consolidados de pequenas dimensões (Coelho *et al.*, 2006).

O fator da cartografia do Uso do Solo reflete os diferentes comportamentos morfológicos, tratando-se de uma orla costeira revestida de vegetação, pavimentada ou sem qualquer tipo de revestimento. Considera-se assim, que quanto maior for o nível de alteração do estado natural de revestimento de um solo, maior será a sua vulnerabilidade.

Tabela III. Classificação de vulnerabilidade dos parâmetros físicos para Portugal Continental, onde 1 significa baixa contribuição e 5 elevada contribuição para a vulnerabilidade.

PARÂMETROS	1	2	3	4	5
REDE HIDROGRÁFICA	não está contido				está contido
DISTÂNCIA À LINHA DE COSTA	> 1000 m	200m - 1000m	50m - 200m	20m - 50m	< 20m
TIPO LINHA COSTA	Costa de arriba				Costa baixa e arenosa
GEOLOGIA SÓLIDA	Rochas Ergativas Plúvicas e Vulcânicas		Form. Sedimentares e Metamórficas		Form. Sedimentares
DERIVA GEOLÓGICA	urbano; rocha	pedra; argila		praias; depósitos	aluvão; areia solta; cascalho;
USO DO SOLO	corpos de água; pântano; escassa vegetação; rocha nua	áreas costeiras	floresta	agricultura	infraestruturas urbanas e industriais

## 2.3. Processo de análise hierárquica (AHP)

O método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) destina-se a hierarquizar um conjunto de alternativas avaliadas em função de um conjunto de critérios. Este método calcula os pesos usados na ordenação das alternativas a partir de uma matriz onde o decisor efetua comparações de relação de importância entre os critérios (atributos) característicos das diferentes alternativas (Le Cozannet *et al.*, 2013).

Segundo Saaty (1987), este método surgiu da necessidade de dar resposta à combinação de diferentes alternativas, medidas em diferentes escalas de referência, a serem analisadas tendo em conta a experiência e a perceção do valor dos decisores. Foi usada a escala de nove níveis proposta por Saaty (1987) na comparação par a par.

Tabela IV. Escala de preferências com nove níveis, proposta por Saaty (1987).

INTENSIDADE DE IMPORTÂNCIA	DEFINIÇÃO	EXPLICAÇÃO
1	Igual importância	Duas atividades contribuem com igual importância
3	Importância moderada de um sobre o outro	A experiência e o julgamento favorecem moderadamente uma atividade em detrimento da outra
5	Importância forte ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em detrimento da outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida e é demonstrado na prática
9	Importância extrema	Não existe outra atividade com tanta importância comprovada
2,4,6,8	Valores intermédios entre dois conjuntos adjacentes	Quando necessário
RECÍPROCOS	Se a atividade <i>i</i> tem um dos números acima diferentes de zero quando comparada com a atividade <i>j</i> , então <i>j</i> tem o valor recíproco quando comparado com <i>i</i>	Suposição razoável

Deste modo, foi construída uma matriz de comparação par a par para cada um dos parâmetros em análise (Tabela V), com a qual se obteve o peso a dar a cada um dos parâmetros para a determinação do índice de vulnerabilidade.

Tabela V. Matriz de comparação par a par dos parâmetros físicos e sua respetiva contribuição (em percentagem) no índice de vulnerabilidade costeira

PARÂMETROS FÍSICOS	Cenário de Inundação	Rede Hidrográfica	Tipo de Linha de Costa	Distância à linha de costa	Geologia Sólida	Deriva Geológica	Uso do Solo	Contribuição no índice de vulnerabilidade
CENÁRIO DE INUNDAÇÃO	1.00	2.00	3.00	3.00	5.00	7.00	8.00	34 %
REDE HIDROGRÁFICA	0.50	1.00	2.00	2.00	3.00	5.00	7.00	21 %
TIPO DE LINHA DE COSTA	0.33	0.50	1.00	1.00	3.00	5.00	7.00	15 %
DISTÂNCIA À LINHA DE COSTA	0.33	0.50	1.00	1.00	3.00	5.00	7.00	15 %
GEOLOGIA SÓLIDA	0.20	0.33	0.33	0.33	1.00	3.00	5.00	8 %
DERIVA GEOLÓGICA	0.14	0.20	0.20	0.20	0.33	1.00	3.00	4 %
USO DO SOLO	0.13	0.14	0.14	0.14	0.20	0.33	1.00	2 %

## 3. RESULTADOS

Como já foi referido anteriormente, os cenários de subida do NMM e o índice de vulnerabilidade foram calculados sob um MDT da zona costeira de Portugal Continental.

Na Fig. 3 e Fig. 4 é possível visualizar as zonas inundáveis em 2050 e 2100, respetivamente, com o modelo de maré mais SM. É de notar que o período de 2050 a zona costeira da Costa da Caparica ficará possivelmente com algumas infraestruturas (habitações e vias de comunicação) afetadas com a subida do NMM e a maré máxima a atingir uma cota de 2.7 m. Cenário que poderá ocorrer em 0.25% do ano, ou seja, o correspondente a algumas horas nos períodos de preia-mar máxima de marés vivas equinociais. No caso de ocorrência do cenário que correspondente a um nível de submersão de 0.25% em 2100, com SM de 50 anos de período de retorno, é de notar um acréscimo significativo na área que será inundável, mesmo que esporadicamente. Essa área, correspondente a quase 5 Km<sup>2</sup>, engloba a maior parte das infraestruturas da zona costeira da Costa da Caparica.

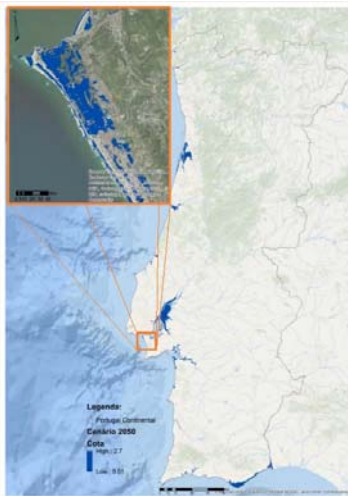


Fig. 3. Cenário de inundação em 2050, com o modelo de maré mais SM com período de retorno de 40 anos para 0.25% de submersão. Zoom feito para a zona da Costa da Caparica.



Fig. 4. Cenário de inundação em 2100, com o modelo de maré mais SM com período de retorno de 50 anos para 0.25% de submersão. Zoom feito para a zona da Costa da Caparica.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados aqui apresentados são ainda preliminares, dada a dificuldade de desenvolver uma

base de dados consistente e coerente para ser analisada em ambiente SIG. Como tal, não foi ainda possível determinar o índice de vulnerabilidade costeiro para os três períodos de cenários futuros (2025, 2050 e 2100) e com os diferentes períodos de retorno e percentagem de submersão.

No entanto, esta comunicação pretende apresentar a metodologia que será adotada quando estiverem reunidos todos os dados necessários, com a qualidade exigível para este tipo de trabalho.

#### Agradecimentos

À Direção Geral do Território pela cedência dos dados do modelo digital de terreno de alta resolução.

#### REFERÊNCIAS

- Antunes, C. (2011). Variação atual do NMM em Cascais. *Atas da VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia – CNCG2011*, Porto, 358-365.
- Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F., Taveira Pinto, F. (2006). A Vulnerability analysis approach for the Portuguese West Coast. *Risk Analysis V: Simulation and Hazard Mitigation*, 251-262.
- IPCC (2014). Annex II: Glossary. In: *Climate Change 2014, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1757-1776.
- Le Cozannet, G., M., Bulteau, T., Mirgon, C., Yates, M. L., Méndez, M., Baills, A., Idier, D., and Oliveros, C. (2013). An AHP – derived method for mapping the physical vulnerability of coastal areas at regional scales. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 1209-1227.
- Marcy, D., Herol N., Waters K., Brooks W., Handley B., Pendleton M., Schmid K., Sutherland M., Dragonov K., McCombs J., Ryan S. e Bladwin Group (2011). New Mapping Tool and Techniques for Visualizing Sea Level Rise and Coastal Flooding Impacts. *NOAA Coastal Services Center*, South California, pp20.
- Saaty, R.W. (1987). The Analytic Hierarchy Process – What it is and how it is used. *Math Modelling*, 9, 161-176.
- Santos, F., Lopes, A.M., Moniz, G., Ramos, L. e Taborda, R. (2014). Gestão da Zona Costeira – O Desafio da Mudança. *Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral*, pp255.
- Vieira, R., Antunes, C. e Taborda, R. (2012). Caracterização da sobrelevação meteorológica em Cascais nos últimos 50 anos. *Atas das 2<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 175-178.