

Quantificação e cartografia da extensão de inundação costeira em Bissau, Guiné-Bissau: perspetiva em cenário de alterações climáticas

Quantification and mapping of coastal flooding extension for Bissau, Guinea-Bissau: a climate change scenario perspective

M. B. Fandé^{1*}, C. Ponte Lira^{2,3}, C. Antunes^{2,4}, G. Penha-Lopes¹

Recebido em 28/02/2018 / Aceite em 16/12/2019

Publicado em agosto de 2020

© 2020 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP

Artigo original
Original article

Resumo: A inundação costeira (IC) constitui um dos impactos mais significativos da elevação do nível do mar (ENM) resultante das alterações climáticas. A cidade de Bissau, que alberga ~25% da população da Guiné-Bissau, já é afetada pela IC devido às marés e tempestades, esperando-se um agravamento devido à ENM. Este artigo avaliou a vulnerabilidade à IC em cenário de ENM na cidade de Bissau, através do modelo de superfície de inundação única, considerando um valor único de inundação, aqui referido como nível total de água (NTA) e uma superfície topográfica. A extensão da inundação foi quantificada e cartografada usando o NTA estimado para 2100 (5,2 m). Os resultados indicam que a área potencialmente inundada corresponde a 29,3% do total da área de estudo. A zona Sudoeste da cidade é a mais exposta à inundação, devido à baixa altitude e ocupação desordenada de terrenos, tornando esta região mais vulnerável num cenário de alterações climáticas.

Palavras chave: Modelo de inundação de superfície única, TanDEM-X, Sentinel 2, mitigação, resiliência.

Abstract: Coastal flooding (CF), enhanced by climate change, is one of the most significant impacts of sea level rise (SLR). Bissau city, home to ~25% of Guinea-Bissau population is already affected by CF due to tides and storms. It is anticipated that the situation will deteriorate in coming decades with the expected scenarios of SLR. This article evaluated the vulnerability to coastal flooding of Bissau, using the single-value model, which considers two variables: inundation value and a topographic surface. The inundation value, here referred as total water level (TWL) was estimated by the sum of three vertical components: astronomical tide (AT), storm surge (SS) and the SLR estimation for the considered scenario. Thus, the inundation extension was quantified and mapped using a TWL estimated for the year 2100, and a high-precision global Digital Elevation Model (DEM – TanDEM-X) of the Bissau region. The results indicate that the land potentially to be flooded corresponds to 29.3% of the study area (94.9 km²). The Southwest zone of Bissau presents greater exposure to flooding, due to its low altitude. Also, the disorderly anthropogenic occupation of flooded lands, makes these areas more vulnerable in a climate change scenario.

Keywords: Single-value inundation model, TanDEM-X, Sentinel 2, mitigation, resilience.

⁴ Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências de Lisboa, Edifício C8, Piso 2, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal.

* Autor correspondente/corresponding author: kattemei@hotmail.com

1. Introdução

As zonas costeiras são um dos locais preferidos para o estabelecimento das populações humanas face aos recursos e serviços que disponibilizam a todos os que vivem nesta zona de interface. A elevação do nível do mar (ENM), registada durante as últimas décadas, e esperada no futuro próximo devido ao aquecimento global (Baird e Cann 2011; Jevrejeva *et al.*, 2016), terá como consequência um aumento da frequência e intensidade da inundação costeira (Bell *et al.*, 2001; Ruckert *et al.*, 2017; Vitousek *et al.*, 2017). Este aumento da suscetibilidade à inundação irá tornar as zonas costeiras mais vulneráveis e, considerando todo o ativo aí existente, representa um maior risco climático (McGranahan *et al.*, 2007).

Existem já alguns trabalhos realizados para a costa da África Ocidental que se focaram no estudo da vulnerabilidade da zona costeira à ENM (Dasgupta *et al.*, 2009; De Sherbinin *et al.*, 2014). No entanto, nenhum abordou com detalhe os fatores que permitem analisar a vulnerabilidade da cidade de Bissau à inundação costeira numa perspetiva de quantificação (*e.g.* ocupação do espaço urbano a nível local), permitindo facilitar a tomada de decisões de mitigação/adaptação.

Este artigo tem como objetivo avaliar as áreas mais suscetíveis à inundação costeira em cenário de ENM na cidade de Bissau. Este trabalho focou-se na cartografia e quantificação de área suscetível à inundação e aborda alguns dos seus efeitos no uso e ocupação do solo. Foi utilizada uma metodologia simplificada, que considera um modelo de inundação de superfície única. Este estudo constitui uma primeira quantificação da extensão de área potencialmente inundável para a cidade de Bissau, considerando o horizonte temporal de 2100. Os resultados apresentados podem ser usados de forma prática em cenários de adaptação.

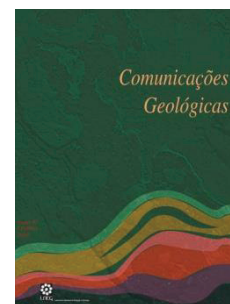
2. Área de estudo

Localizada no estuário do Rio Geba e muito perto do Oceano Atlântico, Bissau é a maior cidade e capital da Guiné-Bissau (Fig. 1). A cidade

¹ Centre for Ecology, Evolution and Environmental Change (cE3c), Faculty of Sciences, University of Lisbon, Edifício C2, Piso 5, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal.

² Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Edifício C1, Piso 1, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal.

³ Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Edifício C6, Piso 3, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal.



apresenta colinas estreitas e alongadas, vastas planícies aluviais, arenosas ou lodosas, sendo ocupada por vastos pântanos junto do canal do Rio Geba (PGUB, 1993). A cidade desenvolve-se em baixa altitude com uma cota máxima de 58 m acima do nível médio do mar (Fig. 1). A população de Bissau tem aumentado no passado recente, tendo observado um crescimento de 255.883 residentes, entre 1979 e 2009, o que corresponde a um aumento de 11% em relação ao total do país (INE, 2013). Projeções do INE (2013) indicam ainda que a população urbana, totalizando 39,6% em 2009, crescerá para 48,6% em 2030. Na definição da área de estudo não foi adotado o limite administrativo do setor autónomo de Bissau, tendo-se criado antes um polígono (Fig. 1) que abrange as áreas urbanas periféricas em rápida expansão, cujos residentes partilham os mesmos serviços e modo de vida. Desta forma, estende-se a área vulnerável à inundação usando critérios de ocupação urbana em detrimento do uso exclusivo das fronteiras administrativas.

3. Metodologia

A inundação costeira pode ser definida pela concretização da condição de submersão pela água marinha, de caráter permanente, de elementos da faixa costeira que habitualmente se encontram a seco (Silva *et al.*, 2013). A metodologia de avaliação da área potencialmente inundável seguiu o modelo de inundação de superfície única (modelo «*bathub*» cf. Schmid *et al.*, 2014), que contempla apenas duas variáveis: um valor de nível de inundação (NI) e a elevação do terreno.

O valor do NI é calculado para cada cenário temporal considerado através da definição do nível total de água (NTA), que corresponde à soma das seguintes componentes verticais: a) nível do mar, determinado pela maré astronómica (MA); b) sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica (SM) espetável para o cenário considerado; c) projeção da subida do nível médio do mar (ENM) para o cenário considerado; e representado a partir da expressão: $NTA = MA + SM + ENM$.

O valor de NTA foi estimado em 5,2 m, para o cenário de 2100 considerando:

- MA de 2,98 m, com referência ao ano de 2015 e obtido da expressão: $MA = PMMax - ZH$, onde o valor PMMax foi calculado com as constituintes harmónicas em de “*Table des Marées des Grands Ports du Monde*”, N° 540, Service

Hydrographique et Oceanographique de la Marine – Paris, para o porto de Bissau.

- SM de 0,3 m, adotando o valor máximo registado na costa da Guiné-Bissau durante a Tempestade Fred ocorrida em 2015 (GDACS, 2016);
- ENM de 1,92 m em 2100, considerando a projeção máxima de Jevrejeva *et al.*, (2016) para Lagos - África Ocidental.

A elevação do terreno foi obtida a partir de um Modelo Digital de Terreno (MDE) da região em análise: MDE – TanDEM-X, fornecido pela German Aerospace Centre (DLR), com resolução espacial de 12,25 m e precisão altimétrica de 2 m (nas zonas baixas). Os dados são referidos à altura elipsoidal, tendo sido convertidos para altura ortométrica usando o modelo de geóide (EGM, 2008). Esta transformação seguiu a expressão: $H = h - N$, onde H é a altura ortométrica, h é a altura elipsoidal e N corresponde ao modelo do geóide utilizado. O ficheiro em formato *raster grid* apresenta tamanho de célula de 2,5 minutos.

Adicionalmente, o pré-processamento do MDE fornecido exigiu a limpeza dos valores anómalos, localizados em superfícies cobertas por água (Fig. 2A), usando uma máscara dos corpos de água existentes. Para isso, uma imagem adquirida na região do infravermelho próximo (NIR – banda 8) do satélite *Sentinel 2* (Fig. 2B), datada de 2017-04-25, foi usada para produzir a máscara dos corpos de água (Fig. 2C). A escolha de um valor de limiar permitiu separar as zonas de terra da água. As imagens NIR permitem cartografar muito facilmente os corpos de água, aproveitando o facto de este tipo de radiação ser totalmente absorvido pela água, não havendo reflexão de volta ao sensor (água aparece representada em tons escuros).

O processamento dos dados foi realizado em ambiente SIG com o software ESRI ArcGIS Desktop®. Após a classificação da área com a cota correspondente ao NTA estimado, procedeu-se à limpeza dos pixels isolados, que aparecem em áreas baixas, mas que não apresentam conexão hidrológica com o mar, de forma a não ser contabilizados de forma errónea no cálculo de área inundável. No processo de cartografia da área suscetível de inundação não foram consideradas as possíveis alterações geomorfológicas resultantes da normal adaptação a uma subida do nível médio do mar não instantânea, ou decorrentes da atividade humana, o que constitui uma limitação do estudo.

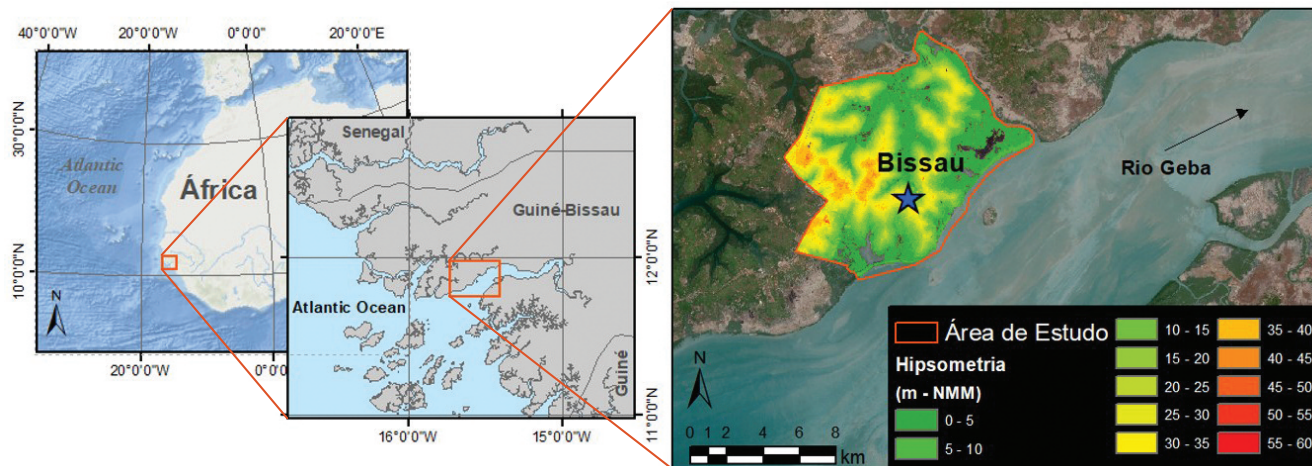


Figura 1. Área de estudo e hipsometria da região.

Figure 1. Study area and hypsometry of the region.

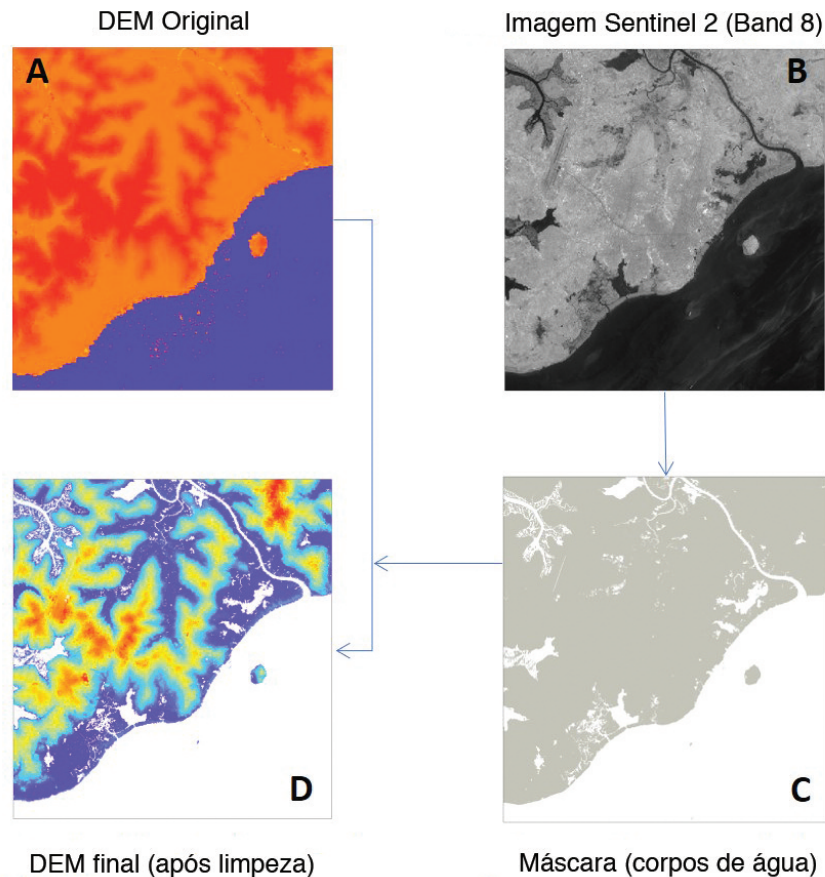


Figura 2. Fluxograma do procedimento de pré-processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE – TanDEM-X). A – MDE original; B – Imagem adquirida na região do infravermelho (banda 8, Sentinel 2, de 2017-04-25); C – máscara dos corpos de água; D – MDE final.

Figure 2. Flowchart of the DEM pre-processing procedures (DEM – TanDEM-X). A – Original DEM; B – NIR image of the region (band 8, Sentinel 2, of 2017-04-25); C – Water bodies mask; D – Final DEM.

4. Resultados e discussão

O resultado da cartografia da extensão suscetível de inundação costeira está ilustrado na Fig. 3. A visualização do mapa de inundação permite perceber a exposição e possíveis impactos. Para além disso, constitui uma ferramenta poderosa para a educação e conscientização da população e das autoridades competentes (NOAA, 2010). A área potencialmente afetada pela inundação representa 29,3 % dos 94,9 km² totais que representam a área de estudo. Atualmente, parte dessa área é ocupada por habitações e infraestruturas e/ou usada como terra agrícola. De notar que os bairros de Cuntum Madina e Quelelé, no Sudoeste, zona predominantemente residencial e composta maioritariamente por habitação precária, apresentam maior risco. O risco dessa área é caracterizado pela grande extensão da área construída e elevada quantidade de casas em condições precárias que poderão ser afetadas pela inundação. Saliente-se que as zonas com cotas mais baixas destes bairros já experimentam severas consequências da inundação costeira. Nos últimos anos, devido ao avanço da água do mar sobre a área urbanizada, principalmente durante marés vivas, alguns moradores viram-se obrigados a abandonar as suas casas enquanto outros continuam a conviver com esse perigo (Fig. 4). O resultado do presente estudo demonstra que este cenário deverá piorar no futuro próximo, com a ENM que se espera para a região (Jevreveja *et al.*, 2016).

A zona velha da cidade, conhecida como “Bissau Velho”, onde se concentram escritórios e atividade comercial, também estará ameaçada pela inundação costeira, além de outras (*e.g.* zonas interiores com conexão hidrológica ao Rio Geba) que serão afetadas em menor proporção.

Ainda, as terras de agricultura urbana e periurbana tenderão a reduzir-se pois passarão a estar permanentemente ou frequentemente inundadas. As terras mais baixas utilizadas para a produção de arroz são, de modo geral, áreas naturalmente inundadas pelo mar, mas convertidas em campos de cultura através de construção de diques “anti-sal” localizados a jusante dos braços de rios, impedindo assim a passagem da água salgada para montante. Recentemente, em agosto de 2015, os diques “anti-sal” e campos de cultura foram severamente atingidos pela inundação causada pela Tempestade Fred, provocando perdas de colheita. A ENM irá aumentar o risco de galgamento e/ou rompimento de diques, comprometendo o cultivo do arroz, meio de subsistência de muitas famílias. A Tempestade Fred também inundou casas no bairro de Cuntum Madina e na cidade velha, o quartel principal da Marinha Nacional, a sede das Nações Unidas e as vias circundantes.

Os esforços de proprietários de habitações, infraestruturas e agricultores têm sido insuficientes para reduzir a vulnerabilidade à inundação costeira, como é esperado para cidades costeiras pobres, devido à falta de recursos (World Bank, 2011). Ainda assim, nota-se

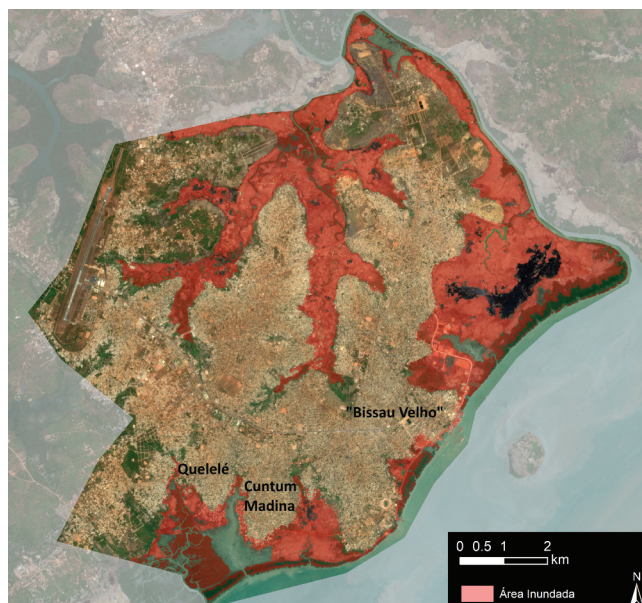


Figura 3. Cartografia da área suscetível de inundação para a cidade de Bissau. Limites do mapeamento correspondem às áreas urbanas periféricas em rápida expansão, cujos residentes partilham os mesmos serviços e modo de vida.

Figure 3. Mapping of the inundation extension for Bissau city. Mapping limits include peripheric urban areas in rapid expansion where residents share the same services and way of life.

em Bissau um perigoso avanço da malha urbana para áreas com cotas baixas e mais expostas à inundação costeira. Basta uma área inundável pelas marés ficar seca por alguns anos (*e.g.* por causa dos diques que protegem as terras agrícolas do avanço da água do mar), para que se observe o avanço da urbanização sobre esta área vulnerável. Esse processo, que contribui para aumentar a perigo e o risco de inundação costeira, pode ser atribuído ao crescimento populacional, à falta de consciencialização da população e à fraca

atuação das autoridades municipais e do governo central ao nível do ordenamento e gestão do território.

5. Conclusão

A inundação costeira será um dos impactos mais significativos resultantes das alterações climáticas na cidade de Bissau, podendo atingir em 2100 cerca de 30% da população atualmente existente na cidade se os cenários de ENM se verificarem. Este estudo constituiu uma oportunidade de quantificar o fenómeno, e assim ajudar nas tomadas de decisão, percebendo quais as futuras zonas de risco de inundação e potenciando a identificação e adoção de medidas de adaptação sustentáveis, particularmente no planeamento e gestão de uso e ocupação do solo. Estas medidas carecem de um suporte quantitativo dos fenómenos de perigosidade nas regiões mais pobres da África Ocidental. A consideração de cenários futuros da ENM no planeamento urbano costeiro pode evitar a ocupação de áreas vulneráveis à inundação, dirigindo a urbanização para as zonas mais seguras, tornando estas áreas mais adaptadas aos possíveis cenários de alterações climáticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT): as bolsas de doutoramento PD/BD/114055/2015 e pós-doutoramento SFRH/BPD/81800/2011; Contract IF/00940/2015. Agradece-se o apoio dos projetos: FCT UID/GEO/50019/2013 – IDL UID/BIA/00329/2013 – Ce3C. Um agradecimento especial a: 1) *German Aerospace Centre (DLR)*, pela cedência do MDE: *Elevation data is a TanDEM-X Digital Elevation Model, derived from TANDEM-X mission and provided by ©DLR 2017 in the scope of project DEM_OTHER0576*; 2) *European Space Agency (ESA)* e ao programa *Copernicus* pela disponibilização gratuita das imagens *Sentinel 2*.



Figura 4. Efeitos de inundação costeira no bairro de Cuntum Madina. A – pormenor das casas abandonadas devido à inundação provocada pela Tempestade Fred (2015); B – pormenor da implementação de casas ainda habitadas em área inundada em maré de águas vivas (Janeiro de 2018).

Figure 4. Coastal flooding effects at the Cutum Madina neighborhood. A – detail of houses abandoned after the flood event of Fred storm (2015). B – detail of houses still inhabited and flooded during spring tides.

Referências

- Baird, C., Cann, M., 2011. *Química ambiental* (4ª ed.). Porto Alegre, Bookman, 844.
- Bell, R.G., Hume, T. M., Hicks, D. M., 2001. *Planning for climate change effects on coastal margins*. N. Z. Ministry for the Environment.
- Dasgupta, S., Laplante, B., Murray, S., Wheeler, D., 2009. Sea-Level Rise and Storm Surges: A Comparative Analysis of Impacts in Developing Countries. DOI: 10.1596/1813-9450-4901.
- De Sherbinin, A., Chai-Onn, T., Jaiteh, M., Pistolesi, L., Schnarr, E., Mara, V., 2014. Mapping the Exposure of Socioeconomic and Natural Systems of West Africa to Coastal Climate Stressors. *Technical report*. USAID, 74.
- EGM, 2008. *Earth Gravitational Model* 2008. EGM08. url: http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html.
- GDACS, 2016. Green alert for storm surge impact in Guinea Bissau. url: <http://www.gdacs.org/Cyclones/Stormsurge.aspx?eventtype=TC&eventid=1000205&episodeid=3>.
- INE, 2013. *Projections Demographiques en Guinee Bissau 2009-2030*. Instituto nacional de Estatística. url: http://www.stat-guinebissau.com/publicacao/Projeccao_demografica.pdf.
- Jevrejeva, S., Jackson, L. P., Riva, R. E. M., Grinsted, A., Moore, J. C., 2016. Coastal sea level rise with warming above 2 °C. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **113**(47): 13342-13347. DOI: 10.1073/pnas.1605312113.
- McGranahan, G., Balk, D., Anderson, B., 2007. The rising tide: Assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, **19**(1): 17-37. DOI:10.1177/0956247807076960.
- NOAA 2010. Technical Considerations for Use of Geospatial Data in Sea Level Change Mapping and Assessment. *NOAA Technical Report NOS 2010-01*, 130. url: https://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/Technical_Use_of_Geospatial_Data_2010_TM_NOS_01.pdf.
- PGUB, 1993. *Plano Geral Urbanístico de Bissau*. Ministério das Obras Públicas da República da Guiné Bissau.
- Ruckert, K. L., Oddo, P. C., Keller, K., 2017. Impacts of representing sea-level rise uncertainty on future flood risks: An example from San Francisco Bay. *Plos One*, **12**(3): e0174666. DOI: 10.1371/journal.pone.0174666.
- Schmid, K., Hadley, B., Waters, K., 2014. Mapping and Portraying Inundation Uncertainty of Bathtub-Type Models. *Journal of Coastal Research*, **30**(3): 548-561. DOI:10.2112/JCOASTRES-D-13-00118.1.
- Silva, A. N., Taborda, R., Lira, C., Andrade, C. F., Silveira, T. M., Freitas, M.C., 2013. *Determinação e cartografia da perigosidade associada à erosão de praias e ao galgamento oceânico*. Projeto CISMIL, Agência Portuguesa do Ambiente (APA), 34 url: <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=7&sub2ref=10&sub3ref=1192>.
- Vitousek, S., Barnard, P. L., Fletcher, C. H., Frazer, N., Erikson, L., Storlazzi, C. D., 2017. Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise. *Scientific Reports*, **7**(1399). DOI: 10.1038/s41598-017-01362-7.
- World Bank, 2011. *Guide to Climate Change Adaptation in Cities*. 100. url: <http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1318995974398/GuideClimChangeAdaptCities.pdf>.