

Vulnerable areas to sea level rise in coastal cities: a study in the city of Recife, Brazil

Gastão C. da Fonseca Neto*, Marcos A. B. da Silva Júnior*, Jaime J. da S. P. Cabral**, Alexson C. da Silva*

*Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, Brasil. E-mails: gastaoacerquinha@gmail.com,
marcos15barbosa@gmail.com, alexsoncaetano@gmail.com

**Universidade Federal de Pernambuco e Universidade de Pernambuco, Recife/PE, Brasil. E-mail: jaime.cabral@gmail.com

Received 20 October 2021; accepted 7 January 2022

Abstract

The rise in mean sea levels is seen by many researchers as the greatest consequence that climate change will bring to coastal cities. This worrying fact represents a threat to the city of Recife, which has a coastal territory, flat and low-lying elevations. Thus, as a first step in applying mitigation measures, the vulnerabilities and specificities of the different regions of the city must be evaluated and understood. Therefore, this work aims to evaluate, in a spatial and quantitative way, the extent of likely areas flooded by tides on sunny days as a result of the sea level rise considering a scenario of climate change. For this purpose, a Digital Terrain Model (DTM) at a scale of 1:5,000 and a vertical error of less than 25 cm was used as a topographic basis for the acquisition of elevations. The results showed that historical areas of Recife, where tourist and leisure activities are explored, as well as an important medical center, tend to be impacted by floods on a sunny day due to the return of water through the drainage system. In addition, the assessment of the extent of damage to the streets and avenues showed a substantial increase in the affected areas, especially in the neighborhoods of Boa Viagem, Afogados and Imbiribeira. It is concluded that the floods can be difficult for people to remain in the affected areas, so that an immediate action is needed in order to seek mitigating alternatives for the climate impacts on the city.

Keywords: urban drainage, floods, climate change.

Áreas vulneráveis ao aumento do nível do mar em cidades costeiras: um estudo na cidade do Recife, Brasil

Resumo

A elevação do nível médio dos mares é compreendida por muitos pesquisadores como sendo a maior consequência que as mudanças climáticas ocasionarão às cidades costeiras. Este fato preocupante representa uma ameaça à cidade de Recife, que possui um território costeiro, plano e de baixas elevações. Assim, como primeiro passo para aplicação de medidas mitigatórias deve-se avaliar e compreender as vulnerabilidades e especificidades das diferentes regiões da malha urbana. Diante disso, este trabalho busca avaliar, de forma espacial e quantitativa a extensão das prováveis áreas inundadas por marés em dias de sol em decorrência do aumento do nível médio dos mares considerando um cenário de mudanças climáticas. Para tal, como base topográfica para aquisição das elevações, foi utilizado um Modelo Digital do Terreno (MDT) na escala de 1:5.000 e erro vertical inferior a 25 cm. Os resultados mostraram que áreas históricas do Recife, onde são exploradas atividades turísticas e de lazer, bem como um importante polo médico, tendem a ser impactadas pelas inundações em dia de sol em razão do retorno da água pelo sistema de drenagem. Além disso, a avaliação quanto à extensão dos danos nas ruas e avenidas demonstrou um aumento substancial nas áreas atingidas com destaque para os bairros de Boa Viagem, Afogados e Imbiribeira. Conclui-se que as enchentes podem dificultar a permanência das pessoas nas áreas afetadas, de forma que se necessita uma ação imediata no sentido de buscar alternativas mitigadoras para os impactos climáticos sobre a cidade.

Palavras-chave: drenagem urbana, inundações, mudanças climáticas.

1. Introdução

As marés são capazes de inundar áreas mesmo sem a ocorrência de chuva. Esse tipo de ocorrência é conhecido como inundação de dia de sol e consiste no alagamento de áreas baixas costeiras em razão do retorno da maré através da drenagem (Sweet e Park, 2014; Sadler et al., 2017). Em casos mais

graves as conformações de alinhamento da Lua com o Sol provocam marés astronômicas mais elevadas, conhecidas como marés de sizígia. Neste caso a maré atinge seu máximo fazendo com que mais pontos da cidade tenham suas ruas alagadas (Cabral e Alencar, 2005). Embora reproduza danos menores à infraestrutura das cidades se comparadas às inundações provocadas pelas chuvas, as oscilações

diárias de maré astronômica já são notadas como sendo capazes de gerar perdas econômicas significativas. Impactam na abertura de comércios, no deslocamento de funcionários para o trabalho, no desenvolvimento do turismo, além dos riscos de danos a veículos e à saúde das pessoas (Georgeson et al., 2016; Hino et al., 2019).

Segundo Habel et al. (2020) existem três tipos de inundação provocada pela maré. A primeira é a inundação direta, descrita como uma inundação das áreas que estão em contato direto com o mar. Essas áreas são facilmente identificáveis através da análise de altitude, determinada por um limiar correspondente a máxima cota admissível sem inundações. O segundo tipo, mais difícil de ser identificado e controlado, é a inundação de maré de retorno pela drenagem, ou maré de retro propagação. Ocorre quando a maré retorna através da rede de drenagem que funciona sob gravidade, atingindo áreas baixas mais distantes do mar. O terceiro tipo é a inundação de lençol freático, quando pelo contato com o solo, o nível de água do lençol freático se eleva a ponto de inundar áreas.

Em um cenário de mudanças climáticas, esses eventos de inundação tendem a se intensificar em razão do aumento do nível médio dos mares, podendo, de diversas maneiras, comprometer o escoamento das estruturas de drenagem, rios e riachos (Hallegate et al., 2013). As alterações climáticas em eventos extremos de chuva têm sido observadas em várias partes do mundo (Arnone et al., 2013; Wang et al., 2014; Forestieri et al., 2017), exigindo diversos estudos que avaliem os efeitos das alterações climáticas nos processos hidrológicos em áreas urbanas, principalmente as costeiras (Francipane et al., 2015; Liuzzo et al., 2015; Pumo et al., 2016; Viola et al., 2016). Blankespoor, Dasgupta e Laplante (2014) avaliaram o impacto deste fenômeno em 86 países em desenvolvimento, os quais, considerando um cenário crítico de elevação, concluíram que, em média, 68% das regiões costeiras desses países apresentam riscos de inundação em detrimento da subida do nível dos mares. Ainda nesse contexto, Fraile-Jurado et al. (2017) aplicaram um método probabilístico para riscos de inundação devido ao aumento do nível dos mares na Espanha. Os resultados mostraram que as áreas baixas que

cercam a região possuem uma alta probabilidade de inundação durante a maré alta, o que poderia dificultar as comunicações por terra e isolar espaços habitados.

Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar, de forma espacial, a extensão das áreas de uma cidade costeira e plana que poderão ser impactadas pelo aumento do nível dos mares, considerando um cenário de mudanças climáticas.

2. Material e métodos

Caracterização da área de estudo

A cidade de Recife está localizada na costa da região nordeste do Brasil (Figura 1). Possui uma população estimada em 1.661.017 de habitantes e uma área de 218,5 km², caracterizada por ser fortemente urbanizada com alta densidade populacional, percentual elevado de impermeabilização do solo e baixas altitudes, o que contribui para alagamentos. O clima é predominantemente quente, com temperatura média de 25°C, precipitação média anual de 2.300 mm, período das chuvas está concentrado entre os meses de março e agosto, sendo o rio Capibaribe, o principal rio que corta a cidade (SEMAS, 2011; SMAS, 2017; Silva Júnior, et al., 2020; IBGE, 2021).

Fatores como o crescimento populacional não planejado, a geomorfologia, a impermeabilização do solo e os aterros contribuem negativamente para a ocorrência dos alagamentos na planície do Recife (Cabral e Alencar, 2005). Falhas na infraestrutura de drenagem podem ser atribuídas ao aumento dos eventos de chuva intensa e à restrição imposta pela maré no exutório do sistema. Na possibilidade de combinação entre tais variáveis climáticas, considerando a configuração de eventos hidrológicos para o futuro, os efeitos serão refletidos na abrangência espacial dos alagamentos, fazendo-os chegar a locais antes não alagáveis, aumentando as cotas de lâmina d'água e os tempos de permanência (Miguez et al., 2011; Silva Júnior e Silva, 2016). Como medidas mitigadoras aos efeitos que as marés têm ocasionado ao sistema, a Prefeitura do Recife tem ampliado as ações de controle através de comportas vagão e flap, bloqueando o retorno da água pela rede de drenagem (Figura 2).

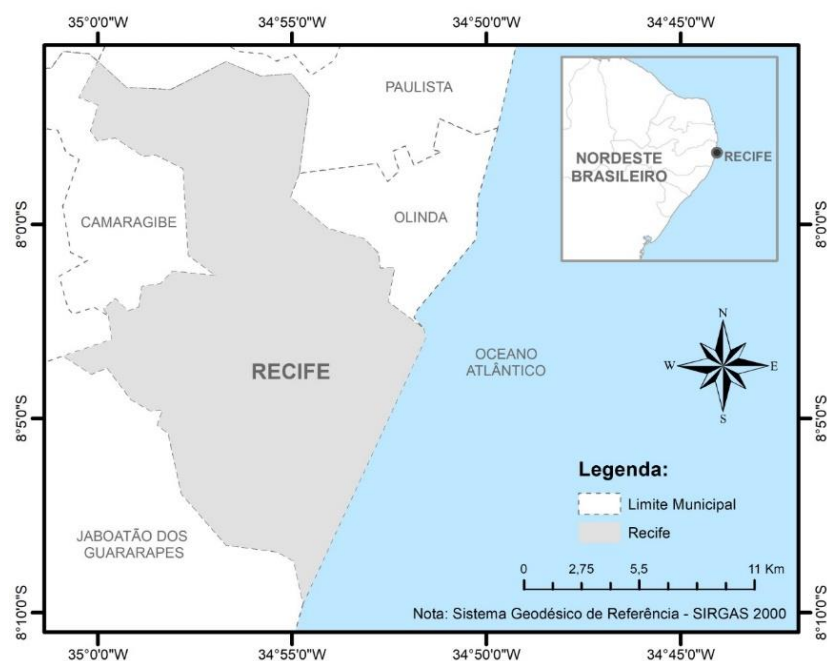


Figura 1- Localização da cidade de Recife.

A



B



Figura 2- Estruturas de controle para bloqueio da maré. Comporta vagão (A) e comporta flap (B).

Dados topográficos e de maré

A base topográfica para aquisição das elevações da cidade foi extraída do Modelo Digital do Terreno (MDT), produto do Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D). Este programa possui informações de modelos digitais de superfície para a cidade de Recife na escala de 1:5.000 e erro vertical inferior a 25 cm, assim como ortoimagens com resolução espacial de 50 cm (Cirilo et al., 2014). A base de dados do PE3D tem sido utilizada para estudos de inundações em Pernambuco, a exemplo de trabalho desenvolvido para a bacia do rio Una por

Ribeiro Neto et al. (2015).

Para a análise de elevação relativa, a fim de identificar as áreas potencialmente atingidas foi necessário realizar um ajuste na conversão dos dados de previsão de maré, estabelecidos segundo o referencial da Marinha (DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação) para o referencial do IBGE. Esta diferença é traduzida em uma redução de 1,14 m nos dados de previsão, de tal forma que uma maré de 2,70 m representa uma cota altimétrica de 1,56 m em relação ao zero do IBGE (Vasconcelos e Bezerra, 2000).

Levou-se em consideração, ainda, as previsões apontadas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), que prevê para Recife um aumento de 0,7 metros até o fim do século. Segundo o relatório produzido pela organização, devido ao aquecimento global, impulsionadas por alterações climatológicas do passado, o nível do mar continuará a subir, mesmo que o lançamento de gases do efeito estufa estabilizem. Assim, para este estudo foi considerado um cenário atual de maré astronômica máxima de 1,56 m (2,70 m-DHN) e um cenário de maré máxima com o aumento previsto pelo Painel, estimado em 2,26 m (1,56 m + 0,70 m).

3. Resultados e discussão

De maneira geral, 12 bairros da cidade de Recife apresentam áreas vulneráveis aos picos de maré periódicos em um cenário atual (2,70 m-DHN). No entanto, este número passa para 28 quando consideramos as previsões futuras, demonstrando que o problema tende a se expandir com o passar dos anos para mais regiões da cidade. Áreas históricas, onde são exploradas atividades turísticas e de lazer como no Bairro do Recife e Rua da Aurora, no Bairro de Santo Amaro (Figura 3), tendem a ser impactadas pelas inundações em dia de sol em razão do retorno da água pelo sistema de drenagem. O Bairro da Ilha do Leite, polo médico do Recife, também é fortemente impactado, com a quase totalidade das vias inundadas (Figura 3.B).

A



B

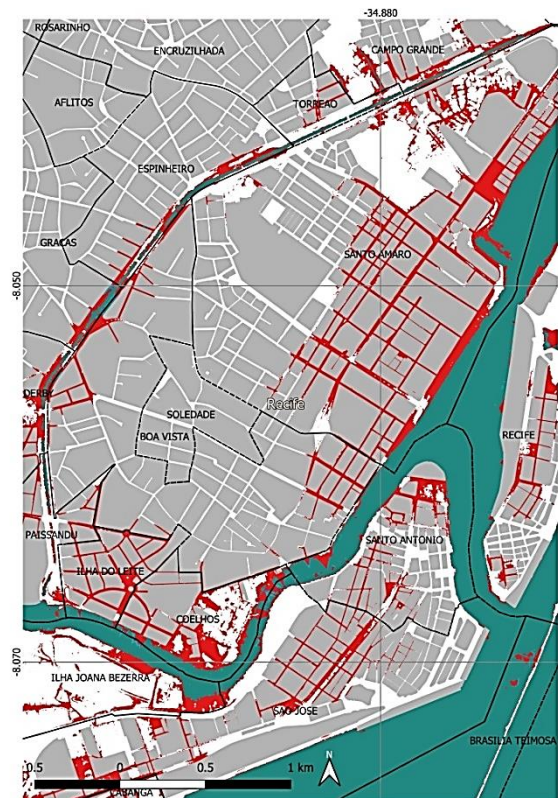
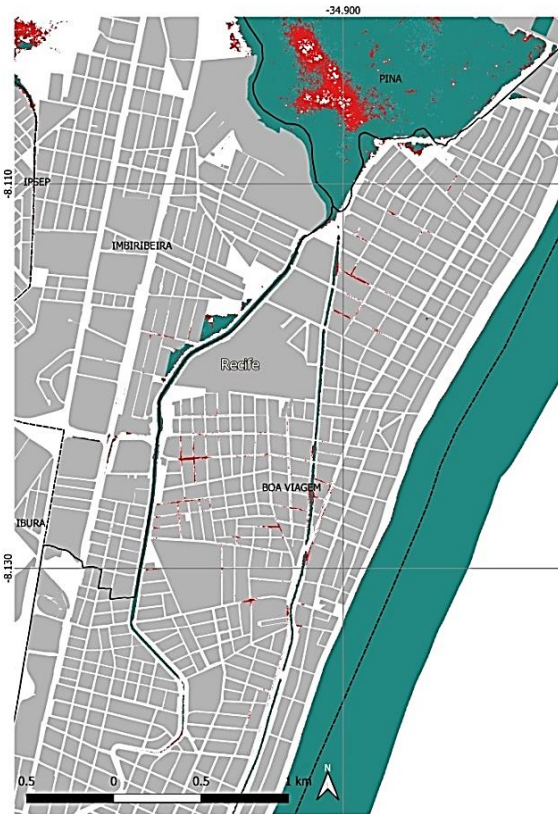


Figura 3- Cenário atual de maré máxima – 1,56 m (referência IBGE) (A) e em cenário futuro – 2,26 m (referência IBGE) (B) em áreas de comércio, turismo e lazer.

Outra região vulnerável é o Bairro de Boa Viagem, zona sul da cidade, onde atualmente possui poucos pontos alcançados pela maré, mas que em um cenário futuro passará a ter grande parte do território inundado (Figura 4). De todas as áreas, os bairros do IPSEP e Afogados são os que apresentam maior

vulnerabilidade para o cenário atual (Figura 5). Tendo em vista as baixas elevações, uma região maior é atingida pela maré, colocando em risco grande parte do bairro de Afogados, Jiquiá, Imbiribeira e IPSEP.

A

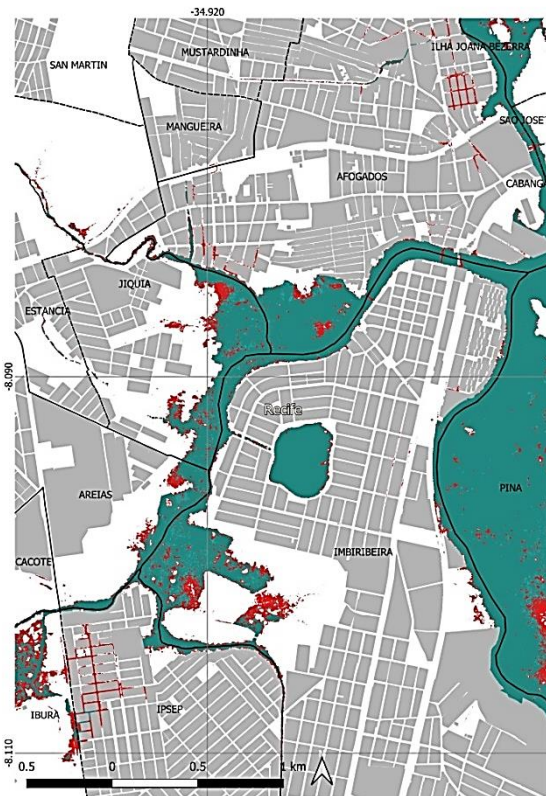


B



Figura 4- Cenário atual de maré máxima – 1,56 m (referência IBGE) (A) e em cenário futuro – 2,26 m (referência IBGE) (B) na zona sul da cidade.

A



B

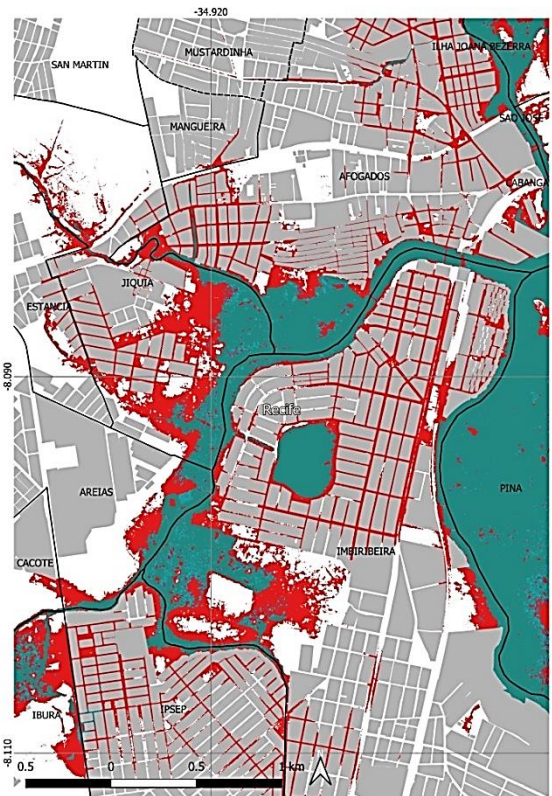


Figura 5- Cenário atual de maré máxima – 1,56 m (referência IBGE) (A) e em cenário futuro – 2,26 m (referência IBGE) (B) com destaque para os bairros de Afogados, Jiquiá, Imbiribeira e IPSEP.

A avaliação quanto à extensão dos danos nas ruas e avenidas de Recife demonstrou um aumento substancial nas áreas atingidas em um cenário futuro de mudanças climáticas, com destaque para os bairros de Boa Viagem, Imbiribeira e Afogados como sendo os mais atingidos, nesta ordem (Tabela 1). Mesmo em um cenário atual, os bairros de Afogados

e Boa Viagem aparecem entre os mais vulneráveis, acompanhados do bairro do IPSEP e Santo Amaro. Na avaliação da densidade de ruas inundadas, obtida da razão entre a extensão das inundações em metros e a área do bairro em hectares, o bairro da Ilha do Leite aparece como o mais vulnerável, seguido pelo IPSEP e Afogados.

Tabela 1. Análise quantitativa das inundações em ruas e avenidas da cidade. Bairros ordenados segundo extensão das inundações em um cenário futuro.

Bairro	Área do Bairro (ha)	Extensão das inundações (m) Cenário atual	Extensão das inundações (m) Cenário futuro	Densidade das inundações (m/ha) Cenário atual	Densidade das inundações (m/ha) Cenário futuro
Boa Viagem	838,10	3.107	44.661	3,71	53,29
Imbiribeira	664,41	379	35.578	0,57	53,55
Afogados	339,31	4.125	29.045	12,16	85,60
Ipsep	177,50	3.240	16.710	18,25	94,14
Bairro Recife	332,75	0	16.293	0,00	48,97
Pina	655,29	0	13.336	0,00	20,35
São José	248,40	266	11.941	1,07	48,07
Jiquiá	170,84	0	7.952	0,00	46,55
Santo Amaro	359,41	2.884	6.411	8,02	17,84
Boa Vista	170,31	646	6.065	3,79	35,61
Santo Antonio	80,13	0	5.585	0,00	69,71
Ilha do Leite	25,85	674	4.410	26,08	170,65
Campo Grande	220,36	0	4.106	0,00	18,63
Cabanga	80,22	0	3.895	0,00	48,56
Madalena	180,43	0	3.630	0,00	20,12
Ilha do Retiro	52,43	0	3.394	0,00	64,73
Coelhos	42,11	140	3.129	3,33	74,31
Derby	48,25	226	2.159	4,68	44,75
Prado	128,07	0	2.059	0,00	16,08
Paissandu	37,19	0	1.850	0,00	49,73
Espinheiro	76,01	175	1.194	2,30	15,71
Areias	241,88	0	904	0,00	3,74
Graças	144,18	640	879	4,44	6,10
Torreão	19,59	0	734	0,00	37,46
Estância	79,59	0	611	0,00	7,68
Hipodromo	30,43	0	519	0,00	17,05
Mangueira	30,92	0	454	0,00	14,69
Encruzilhada	101,59	0	365	0,00	3,59

4. Conclusão

O tema das mudanças climáticas tem sido bastante discutido em todo o mundo e entre as suas principais consequências está a elevação do nível médio dos mares, que caso se concretize, em 2100, se espera que resulte em grandes inundações. Recife, por sua vez, assim como diversas regiões costeiras e

planas, demonstra estar bastante vulnerável a essas consequências.

Grandes porções da malha urbana de Recife estarão sujeitas à variação diária da maré com risco elevado de ocasionar perdas econômicas e estruturais, tendo em vista as inundações em áreas de comércio, hospitais, regiões turísticas e de lazer. Além disso, diversas áreas residenciais serão atingidas o que

poderá inviabilizar a permanência dessas populações nessas regiões.

A ação imediata da população e poder público no sentido de buscar alternativas mitigadoras dos efeitos sobre a cidade são fundamentais, seja na forma de implantação de sistemas de defesa, adaptação das moradias e sistemas sustentáveis de drenagem urbana. Finalmente, trabalhos futuros podem avaliar como o aumento do nível médio dos mares impactam a rede de drenagem nessas regiões, mesmo quando a maré não está em seu pico. Outra análise recomendada é avaliar a duração da inundação para os diversos bairros, ruas e avenidas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (Facepe) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- Arnone, E., Pumo, D., Viola, F., Noto, L.V., La Loggia, G., 2013. Rainfall statistics changes in Sicily. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 2449-2458.
- Blankespoor, B., Dasgupta, S., Laplante, B., 2014. Sea-Level Rise and Coastal Wetlands. *Ambio* 43, 996-1005.
- CABRAL, J.J.S.P., ALENCAR, A.V., 2005. Gestão do território e manejo integrado das águas urbanas. Recife e a convivência com as águas. *Cooperação Brasil – Itália em saneamento ambiental*, ed. Gráfica Brasil, Brasília, pp. 111-130.
- Cirilo, J.A., Alves, F.H.B., Silva, L.A.C., Campos, J. H.A.L., 2014. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. *Revista Brasileira de Geografia Física* 7, 755-763.
- Fraile-Jurado, P., Álvarez-Francoso, J.I., Guisado-Pintado, E., Sánchez-Carnero, N., Ojeda-Zújar, J., Leatherman, S.P., 2017. Mapping inundation probability due to increasing sea level rise along El Puerto de Santa María (SW Spain). *Natural Hazards* 87, 581-598.
- Forestieri, A.E., Arnone, S., Blenkinsop, L.V., Noto, H.F., 2017. The impact of climate change on extreme precipitation in Sicily. *Hydrological Processes* 32, 332-348.
- Francipane, A., Fatichi, S., Ivanov, V.Y., Noto, L.V., 2015. Stochastic assessment of climate impacts on hydrology and geomorphology of semiarid headwater basins using a physically based model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 120, 507-533.
- Georgeson, L., Maslin, M., Poessinouw, M., Howard, S., 2016. Adaptation responses to climate change differ between global megacities. *Nature Climate Change* 6, 584-588.
- Habel, S., Fletcher, C.H., Anderson, T.R., Thompson, P.R., 2020. Sea-Level Rise Induced Multi-Mechanism Flooding and Contribution to Urban Infrastructure Failure. *Scientific Reports* 10, 1-12.
- Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R.J., Corfee-Morlot, J., 2013. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change* 3, 802-806.
- Hino, M., Belanger, S.T., Field, C.B., Davies, A.R., Mach, K.J., 2019. High-tide flooding disrupts local economic activity. *Science Advances* 5, 1-10.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021. Estimativa populacional 2021. Disponível: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso: 1 jun. 2021.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Liuzzo, L., Noto, L., Arnone, E., Caracciolo, D., La Loggia, G., 2015. Modifications in Water Resources Availability Under Climate Changes: A Case Study in a Sicilian Basin. *Water Resources Management* 29, 1117-1135.
- Miguez, M.G., Fernandes, L.C., Azevedo, J.P.S., Magalhães, L.P.C., 2011. Vulnerabilidades da infraestrutura de drenagem urbana e os efeitos das mudanças climáticas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, in: Nobre, C., Young, A. Megacidades, vulnerabilidades e mudanças climáticas: Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, pp 123-144.
- Pumo, D., Caracciolo, D., Viola, F., Noto, L.V., 2016. Climate change effects on the hydrological regime of small non-perennial river basins. *Science of the Total Environment* 542, 76-92.
- Ribeiro Neto, A., Cirilo, J.A., Dantas, C.E.O., Silva, E.R., 2015. Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 20, 394-403.
- Sadler, J.M., Haselden, N., Mellon, K., Hackel, A., Son, V., Mayfield, J., Blase, A., Goodall, J. L., 2017. Impact of Sea-Level Rise on Roadway Flooding in the Hampton Roads Region, Virginia. *Journal of Infrastructure Systems* 23, 05017006(1-7).

- SEMAS. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade, 2011. Plano Estadual de Mudanças Climáticas, 94.
- SMAS. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade, 2017. Relatório de avaliação da pegada de carbono e pegada hídrica da cidade do Recife. 71.
- Silva Junior, M.A.B., Silva, S.R., 2016. Impacts of urbanization and climate change in the drainage system of Recife-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física* 9, 2034-2053.
- Silva Junior, M.A.B., Cabral, J.J.S.P., Fonseca Neto, G.C., Silva, P.O., Guerra, C.M.F., Silva, S.R., 2020. Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE. *Journal of Environmental Analysis and Progress* 5, 302-318.
- Sweet, W.V., Park, J., 2014. From the extreme to the mean: Acceleration and tipping points of coastal inundation from sea level rise. *Earth's Future* 2, 579–600.
- Vasconcelos, R.F.A., Bezerra, O.G., 2000. Atlas ambiental do Recife. Prefeitura da Cidade do Recife/Secretaria de Planejamento, Urbanismo e Meio Ambiente, Recife.
- Viola, F., Francipane, A., Caracciolo, D., Pumo, D., La Loggia, G., Noto, L. V., 2016. Coevolution of hydrological components under climate change scenarios in Mediterranean area. *Science of the Total Environment* 544, 515-524.
- Wang, X., Yang, X., Liu, T., Li, F., Gao, R., Duan, L., Luo, Y., 2014. Trend and extreme occurrence of precipitation in a mid-latitude Eurasian steppe watershed at various time scales. *Hydrological Processes* 28, 5547-5560.