



IMPACTO DA IMPERMEABILIZAÇÃO NA HIDROLOGIA DE UMA BACIA URBANA

Janine Brandão de Farias Mesquita¹ & Iran Eduardo Lima Neto²

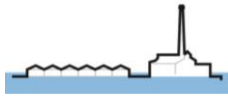
RESUMO – As alterações no uso do solo são fatores marcantes do processo de urbanização. O presente trabalho objetivou analisar o impacto da impermeabilização em uma bacia hidrográfica urbana, localizada em Fortaleza, Ceará. Utilizou-se o modelo hidrológico-hidráulico *Storm Water Management Model* (SWMM). Analisou-se uma série temporal de 20 anos de dados pluviométricos a fim de selecionar três chuvas máximas com coeficiente de retorno de 5, 10 e 50 anos e três anos distintos: com precipitação abaixo da média (2013), típico (2018) e acima da média (2019). Posteriormente, analisaram-se cenários do impacto da impermeabilização na hidrologia, considerando uma impermeabilização de 30%, 57% (atual) e 90%. Estes foram analisados para as precipitações máximas e para três anos selecionados. Os resultados mostraram que para chuvas de grande magnitude, uma diminuição de 20% da impermeabilização reduziria no máximo 12% da vazão de pico da bacia. Já um aumento de cerca de 30% da impermeabilização não alteraria a vazão de pico. Analisando-se cenários para 2013, 2018 e 2019, verificou-se que quanto menos chuvoso o ano, maior a influência da impermeabilização para o aumento da vazão média anual da bacia. Concluiu-se que a bacia já se encontra em estágio crítico de capacidade máxima de impermeabilização.

ABSTRACT– Changes in land use are important factors in the urbanization process. This study aimed to analyze the impact of waterproofing in an urban watershed, located in Fortaleza, Ceará. The Storm Water Management Model (SWMM) hydrological-hydraulic model was used. A 20-year time series of pluviometric data was analyzed in order to select three maximum rainfalls with a return coefficient of 5, 10 and 50 years and three distinct years: with below-average rainfall (2013), typical (2018) and above the average (2019). Subsequently, scenarios of the impact of waterproofing on hydrology were analyzed, considering waterproofing of 30%, 57% (current) and 90%. These were analyzed for maximum rainfall and for three selected years. The results showed that for rains of great magnitude, a 20% decrease in waterproofing would reduce a maximum of 12% of the basin's peak flow. An increase of around 30% in waterproofing, on the other hand, would not alter the peak flow. Analyzing scenarios for 2013, 2018 and 2019, it was found that the less rainy the year, the greater the influence of waterproofing to increase the average annual flow of the basin. It was concluded that the basin is already in a critical stage of maximum waterproofing capacity.

Palavras-Chave – Impermeabilização, Hidrograma, SWMM.

1) Professora Assistente. Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus Crateús. Rodovia BR-226, Km 04, s/n, São Vicente, CEP: 63700-000. Crateús, CE, Brasil. Fone/Fax: +55 88 3691-9700. E-mail: janine@crateus.ufc.br

2) Professor Associado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus do Pici, Bloco 713. Pici. CEP: 60455-900. Fortaleza, CE, Brasil. Fone/Fax: +55 85 3366-9776. E-mail: iran@deha.ufc.br



1. INTRODUÇÃO

As modificações do estado físico da água, que compõe o ciclo hidrológico, são um importante indicador das características ambientais das bacias hidrográficas. As alterações no uso do solo são fatores marcantes do processo de urbanização (Mesquita e Lima Neto, 2019; Mesquita *et al.*, 2020b). Nesta, a remoção da cobertura vegetal e a impermeabilização do solo têm sido apontadas como um dos principais elementos responsáveis pela alteração do ciclo hidrológico.

Diversos impactos na hidrologia podem estar relacionados diretamente à urbanização sem planejamento (Araújo e Lima Neto, 2018; Araújo *et al.*, 2019; Mesquita *et al.*, 2020a; Mesquita *et al.*, 2020b; Fraga *et al.*, 2020), como o aumento das vazões de pico e a diminuição do tempo de concentração das bacias (Campos *et al.*, 2020). Portanto, o hidrograma da bacia pode ser modificado. Aliado ao processo de urbanização, normalmente tem-se a construção dos sistemas de drenagem urbana artificial, com a implantação da infraestrutura tradicionalmente empregada nos sistemas de macro e microdrenagem. Estes objetivam minimizar, em escala local, os transtornos decorrentes da remoção da cobertura vegetal e do aumento das áreas impermeáveis, que ocasionam a redução da infiltração e a elevação do escoamento superficial (Tucci *et al.*, 1995).

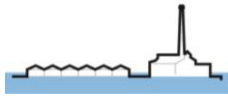
Estudos relacionados à modelagem e simulação hidrológica-hidráulica dos sistemas de drenagem urbana são essenciais para a representação dos processos físicos nas bacias hidrográficas urbanas (Rai *et al.*, 2017; Rjeily *et al.*, 2017; Mesquita *et al.*, 2017; Mesquita *et al.*, 2020b). Ademais, a modelagem computacional possibilita a análise de diversos cenários, otimizando custos e permitindo a proposição de medidas mitigatórias (Mesquita e Lima Neto, 2019; Mesquita *et al.*, 2020b). Dessa forma, as ferramentas de modelagem podem subsidiar os tomadores de decisão. Mesquita *et al.* (2020b), por exemplo, modelaram o sistema de drenagem urbana da bacia Vertente Marítima de Fortaleza, Ceará, Brasil. A área de estudo analisada é densamente urbanizada, constituída por bacias com impermeabilização média de 55%.

Nesse sentido, o presente trabalho objetiva analisar o impacto da impermeabilização em uma bacia hidrográfica urbana, localizada em Fortaleza, Ceará. Almeja-se aplicar uma ferramenta para a modelagem computacional, que possa subsidiar os tomadores de decisão na proposição de medidas mitigatórias efetivas, visando minimizar os impactos da urbanização na hidrologia.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

A área de estudo compreende a bacia do açude Santo Anastácio, localizado em Fortaleza, Ceará, região Nordeste do Brasil. Trata-se de uma bacia urbana (Figura 1), constituída total e parcialmente pelos bairros Amadeu Furtado, Bela Vista, Bonsucesso, Couto Fernandes, Demócrito



Rocha, Jóquei Clube, Pici, Parangaba e Rodolfo Teófilo. Possui área de 611,27 ha, sendo predominantemente descaracterizada de sua composição natural. Como curso d' água principal, possui um canal de drenagem urbana de aproximadamente 2,5 km com seção retangular, exutório da lagoa da Parangaba, localizada à montante, além de diversas galerias de drenagem urbana que deságuam no referido canal. Além disso, o canal possui ao longo de seu percurso diversas contribuições de efluentes sanitários, mantendo a lâmina de água entre 0,2 e 0,3 m, aproximadamente (Mesquita *et al.*, 2020a).

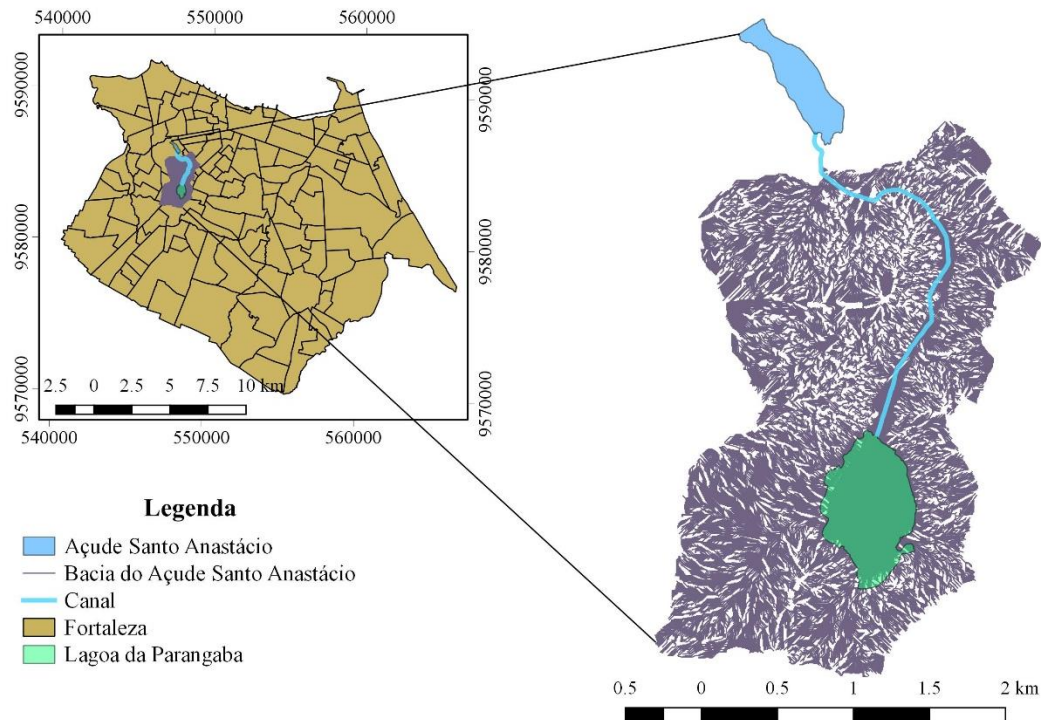
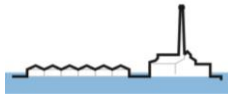


Figura 1- Bacia urbana do açude Santo Anastácio, localizado em Fortaleza, Ceará, Brasil.

2.2. Modelagem hidrológica e hidráulica

Para a modelagem hidrológica e hidráulica da bacia do açude Santo Anastácio, foi utilizado o modelo computacional *Storm Water Management Model* (SWMM), *software* amplamente utilizado para bacias urbanas (ROSSMAN, 2015). O SWMM é um modelo de transformação chuva-vazão hidrodinâmico unidimensional que utiliza para a simulação hidráulica as equações da onda dinâmica e sua simplificação (onda cinemática, considerando o regime de escoamento permanente). O SWMM representa tanto os processos hidrológicos sobre a bacia (precipitação, infiltração e escoamento, por exemplo), como também simula as condições hidráulicas do escoamento nos condutos, como propagação de ondas e os efeitos do remanso. O SWMM foi selecionado para a realização deste trabalho, pois é *software* livre e amplamente utilizado, tendo sido aplicado em diversos estudos reportados na literatura (*e.g* Rai *et al.*, 2017; Rjeily *et al.*, 2017; Mesquita *et al.*, 2017; Mesquita *et al.*, 2020b).



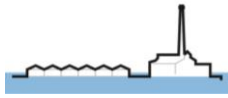
O domínio de modelagem no SWMM para a bacia do açude Santo Anastácio está dividido em seis sub-bacias; oito junções, para as quais aflui a vazão representativa das galerias; oito condutos, estes compõem o canal afluente ao açude Santos Anastácio; um pluviômetro (localizado no campus do Pici da UFC); e, finalmente, um exutório, afluente ao açude Santo Anastácio. Os dados de entrada exigidos pelo SWMM, dentre outros, são os seguintes para as bacias: percentual de impermeabilização (% *imperv*); número de Manning para impermeabilização e permeabilização (N_{imperv} e N_{perv} , respectivamente); o armazenamento nas superfícies impermeável e permeável ($D_{store-imperv}$ e $D_{store-perv}$, respectivamente); e o método de infiltração do solo, do qual há quatro modelos disponíveis: Green Ampt, Green Ampt modificado, Horton e Número da Curva (*Curve Number* - CN do *Soil Conservation Service* – SCS, Estados Unidos) (ROSSMAN, 2015). Além destes parâmetros, há ainda a área da bacia e a declividade, sendo estas variáveis definidas no processo de delimitação das bacias e nos ajustes efetuados no próprio SWMM. O modelo de infiltração selecionado neste trabalho foi o CN. As contribuições de tempo seco no SWMM foram obtidos através dos dados das campanhas de medição da vazão ao longo do canal realizadas em outubro de 2013 e comparadas às vazões medidas durante os demais meses de estiagem.

2.3. Calibração e validação

Os processos de calibração e validação foram realizados comparando-se os dados de vazão medidos na estrada do açude Santo Anastácio e modelados pelo SWMM. As análises estatísticas realizadas foram o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), coeficiente de determinação (R^2) e desvio em relação ao ajuste perfeito do modelo. Os dados utilizados para a calibração foram as vazões medidas em 2013 e 2014 e, para a validação, em 2018 e 2019. Ressalta-se que a calibração consistiu no ajuste manual dos parâmetros do modelo, já mencionados, de acordo com a comparação das vazões simuladas, obtidas no hidrograma, às vazões medidas no horário correspondente. O intervalo de tempo definido para a obtenção dos hidrogramas neste processo foi de 15 minutos.

2.4. Impacto da impermeabilização na hidrologia

Foram analisadas as precipitações de uma série histórica de 20 anos, da qual selecionaram-se três anos distintos: com precipitações acima da média histórica (2019), abaixo da média (2013) e um ano próximo à média (2018), considerado típico. O intervalo de tempo definido para a simulação no SWMM foi horário durante cada ano correspondente. Foram realizadas simulações no SWMM para os anos de 2013, 2018 e 2019 considerando três cenários de impermeabilização da bacia hidrográfica: a condição atual, calibrada no SWMM, entre 50 e 60% de impermeabilização;



cenário otimista, com 30% de impermeabilização; e cenários pessimista, com 90% de impermeabilização. O cenário equivalente a 30% de impermeabilização poderia ser alcançado através de intervenções na bacia que impactassem positivamente no sistema de drenagem, com a implantação de medidas mitigadoras e compensatórias, como telhados verdes, aumento das áreas permeáveis nos lotes, reservatórios individuais nas residências, expansão das áreas verdes, dentre outros (Tucci *et al.*, 1995). Já o cenário com 90% de impermeabilização é a tendência do processo de urbanização e adensamento populacional sem planejamento.

Inicialmente, verificou-se o impacto das mudanças mencionadas no hidrograma da bacia. Para tal, analisaram-se as precipitações máximas de uma série temporal com 20 anos de dados (2000 a 2019), considerando chuvas com períodos de retorno (T_r) de 5, 10 e 50 anos. Analisaram-se, para as séries de precipitações máximas anuais, as distribuições de probabilidade Log Normal, Gumbel e Gamma; como critério de escolha, aplicou-se o teste qui-quadrado (χ^2), considerando um nível de significância de 5%. De posse das três precipitações máximas selecionadas para os seus respectivos períodos de retorno, foram realizadas nove simulações no SWMM, considerando os três cenários mencionados, com vista a verificação do impacto nas vazões de pico e no tempo de concentração da bacia, variáveis que podem afetar diretamente as cheias no lago. Além disso, os hidrogramas são indicadores diretos do impacto da impermeabilização nas características hidrológicas da bacia.

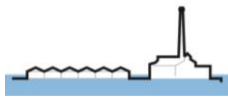
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Calibração e validação

No processo de calibração dos parâmetros do modelo SWMM, obteve-se um NSE de 0,91, coeficiente R^2 de 0,91 e desvio médio de 33%. Já o processo de validação do SWMM, com dados do ano 2018 e 2019, para as mesmas variáveis estatísticas, resultaram em NSE de 0,83, coeficiente R^2 de 0,88 e desvio médio de 49%. Pesquisas anteriores realizadas com o SWMM obtiveram valores de CNS de 0,616–0,899, em Orissa, Índia (Rai *et al.*, 2017); 0,71–0,75, em Lille, França (Rjeily *et al.*, 2017); 0,76–0,78, em Helsinque, Finlândia (Warsta *et al.*, 2017); e 0,927, em Fortaleza, Brasil (Mesquita *et al.*, 2020b). Em relação ao desvio médio, Mesquita *et al.* (2020b) obtiveram valores variando entre 6,8 e 54%. Portanto, o presente trabalho apresenta valores dentro das faixas reportadas pela literatura, atestando a representatividade do modelo chuva-vazão utilizado para a bacia em estudo.

3.2. Análise do impacto da impermeabilização na hidrologia

O ajuste das funções de probabilidade e o teste de aderência para a série temporal de 20 anos de chuvas máximas apontou que o melhor ajuste foi a função LogNormal, considerando os três



períodos de retorno analisados (5, 10 e 50 anos). Nesse sentido, as chuvas máximas encontradas foram de 252.9 mm, 224.4 mm e 146.7 mm para os anos de 2012, 2004 e 2003, respectivamente. A Figura 2 apresenta os hidrogramas gerados pelo SWMM, para as precipitações com diferentes magnitudes, como demonstração do padrão geral do modelo. Observa-se no hidrograma que a vazão é bastante concentrada no tempo, resultando em uma vazão de pico mais rápida, típica de bacias urbanas, onde o grau de impermeabilização diminui o tempo de concentração e aumenta a magnitude dos hidrograma, além de serem agravadas pela intensidade características das chuvas na região, típicas do Nordeste brasileiro (Mesquita *et al.*, 2020b). Campos *et al.* (2020) também obtiveram o hidrograma para a bacia afluente ao açude Santo Anastácio com o tempo de concentração de aproximadamente duas horas, corroborando com o hidrograma gerado pelo SWMM neste trabalho.

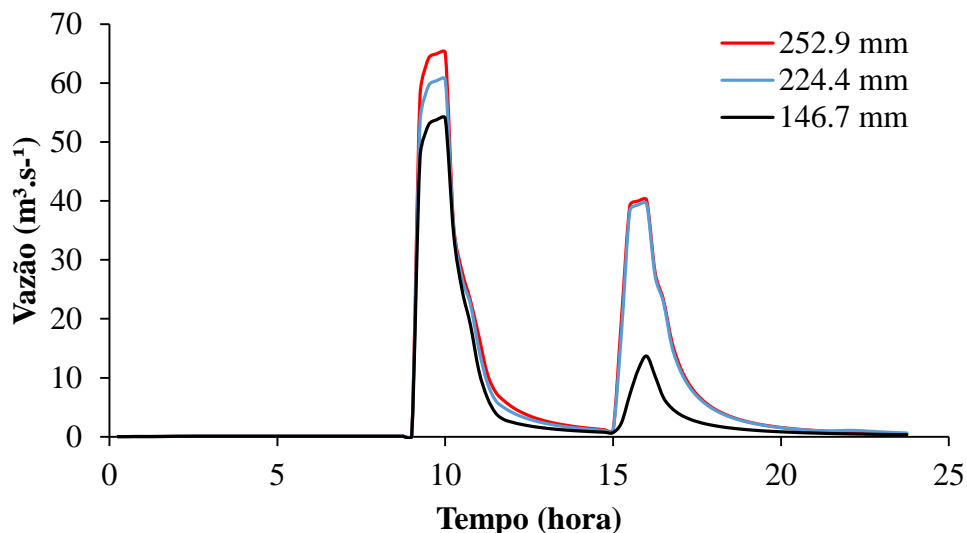
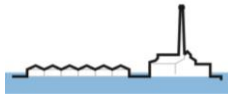


Figura 2 – Hidrogramas gerados a partir das simulações no SWMM com as chuvas máximas de 1 dia nos anos de 2012 (252.9 mm), 2004 (224.4 mm) e 2003 (146.7 mm) na bacia do açude Santo Anastácio, em Fortaleza, Ceará.

Ademais, verifica-se, através dos cenários analisados, que uma diminuição de 20% da impermeabilização da bacia reduz a vazão de pico no exutório em 12, 11 e 9% para os períodos de retorno de 5, 10 e 50 anos, respectivamente. No entanto, um aumento de cerca de 30% da impermeabilização praticamente não altera a vazão de pico. Por outro lado, o acréscimo da impermeabilização aumenta a quantidade e intensidade das inundações ao longo do canal para todos os períodos de retorno analisados, conforme esperado. Tal fato indica que a bacia já se encontra em seu estágio crítico de capacidade máxima de impermeabilização. Portanto, qualquer aumento de impermeabilização resultará em inundações locais, já existentes, mas com acúmulo de volume do escoamento superficial mais acentuado, podendo causar maiores transtornos à população local. Já na avaliação das séries temporais de vazões geradas pelo SWMM em 2013, 2018 e 2019, observou-



se que há uma maior afluência do lago predominantemente no primeiro semestre do ano, resultante das precipitações concentradas temporalmente, especialmente de janeiro a maio. No segundo semestre, as vazões de entrada do canal são em sua maioria oriundas principalmente da contribuição do lançamento de efluente sanitário às galerias afluentes ao canal, bem como diretamente neste (Araújo e Lima Neto, 2018; Araújo *et al.*, 2019; Rocha *et al.*, 2019; Rocha *et al.*, 2020). Estes padrões também são consistentes com os reportados por Pacheco e Lima Neto (2017) e Fraga *et al.* (2020) em medições realizadas na mesma área de estudo em 2014 e 2018, respectivamente.

Já a Figura 3 apresenta as vazões médias anuais resultantes dos diferentes cenários de impermeabilização da bacia analisados em 2013, 2018 e 2019.

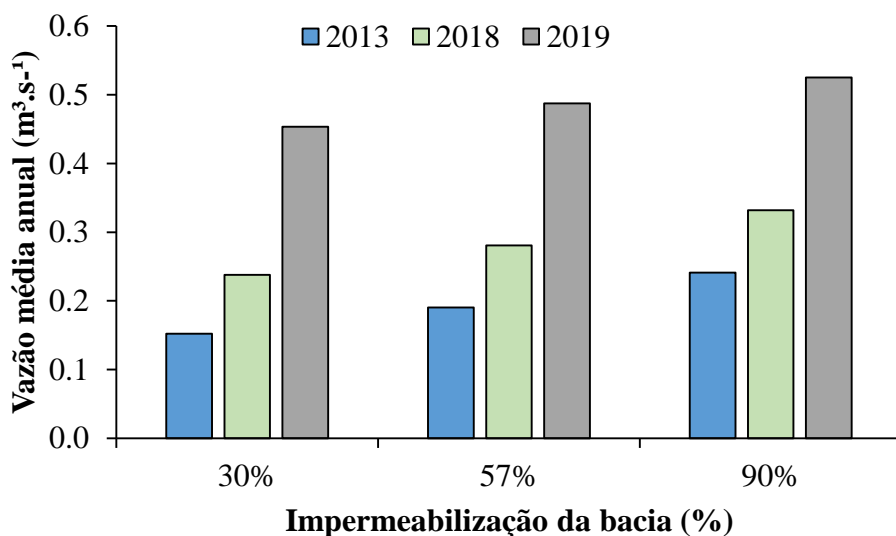
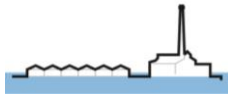


Figura 3 – Comparação dos cenários de diminuição (30%) e aumento (90%) da impermeabilização na bacia do açude Santo Anastácio em relação à impermeabilização real (57%) nos anos de 2013, 2018 e 2019.

Comparando-se as séries anuais de vazão geradas para os três anos selecionados (2013, 2018 e 2019), verifica-se que quanto menos chuvoso o ano, maior a influência da impermeabilização para o aumento da vazão média anual no exutório da bacia. Obtiveram-se, para a redução de 20% e aumento de 33% da impermeabilização em relação a atual impermeabilização (média de 57%), impactos de aumento e diminuição das vazões médias anuais da ordem de 21, 15 e 7% para os anos de 2013, 2018 e 2019, respectivamente. Portanto, estes resultados demonstram que as vazões escoadas no exutório da bacia tendem a uma estabilização, à medida que se aumenta também as precipitações totais anuais, provavelmente devido à capacidade máxima de escoamento do canal. Naturalmente, deduz-se que estas características resultariam em inundações mais frequentes na bacia, conforme já discutido.



4. CONCLUSÕES

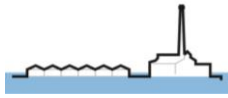
O presente trabalho analisou o impacto da impermeabilização do solo na hidrologia de uma bacia hidrográfica urbana. Por meio da análise dos hidrogramas da bacia, pode-se concluir que para chuvas de grande magnitude, uma diminuição de 20% da impermeabilização reduziria no máximo 12% da vazão de pico no exutório da bacia. Já um aumento de cerca de 30% da impermeabilização praticamente não alteraria a vazão de pico. Por outro lado, o aumento da impermeabilização ocasionaria inundações mais intensas e frequentes ao longo da bacia. Verificou-se também, analisando-se cenários com os anos com precipitações anuais abaixo da média, acima da média e considerado típico, que quanto menos chuvoso o ano, maior a influência da impermeabilização para o aumento da vazão média anual no exutório da bacia. Dessa forma, a análise dos cenários indicou que a bacia já se encontra em estágio crítico de capacidade máxima de impermeabilização (média de 57%). Portanto, este trabalho evidencia importância da adoção de ferramentas de simulação que auxiliem à gestão das águas urbanas.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES (edital PROEX 20/2016; e PRINT, edital 88881.311770 / 2018-01), e pela Fundação de Pesquisa do Estado do Ceará - FUNCAP (edital PNE-0112-00042.01.00 / 16).

5. REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, G. M., LIMA NETO, I. E., BECKER, H. (2019). *Phosphorus dynamics in a highly polluted urban drainage channel shallow reservoir system in the Brazilian semiarid*. Annals of the Brazilian Academy of Sciences, 91(3). <http://dx.DOI.org/10.1590/0001-3765201920180441>
- ARAÚJO, G. M.; LIMA NETO, I. E. (2018). *Removal of organic matter in stormwater ponds: a plug flow model generalisation from waste stabilisation ponds to shallow rivers*. Urban Water Journal, 15(9), 918-924. <https://DOI.org/10.1080/1573062X.2019.1581231>
- CAMPOS, J. N. B; RABELO, U. P.; LIMA NETO, I. E. (2020). *The Bell-Shaped Unit Hydrograph for Overland Planes*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 146(5), 1-6. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001465
- FRAGA, R. F.; ROCHA, S. M. G.; LIMA NETO, I. E. Impact of flow conditions on coliform dynamics in an urban lake in the Brazilian semiarid, *Urban Water Journal*, v. 17, n. 1, p. 43-53, 2020. DOI: 10.1080/1573062X.2020.1734948
- MESQUITA, J. B. F.; LIMA NETO, I. E.; RAABE, A.; DE ARAÚJO, J. C. (2020a). *The influence of hydroclimatic conditions and water quality on evaporation rates of a tropical lake*. Journal of Hydrology, v. 590, p. 125456. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125456>.
- MESQUITA, J. B. F.; PEREIRA, S. P.; LIMA NETO, I. E. (2020b). *Modelagem da drenagem urbana e avaliação das cargas bacteriológicas na Vertente Marítima de Fortaleza, Ceará*. Engenharia Sanitária e Ambiental, 25(1), 205-216. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522020189161>
- MESQUITA, J. B. F.; PEREIRA, S. P.; LIMA NETO, I. E. (2017). *Modelagem matemática da qualidade da água integrando drenagem urbana e hidrodinâmica costeira*. In: Anais do CONGRESSO ABES/FENASAN 2017, São Paulo, 2017.



- MESQUITA, J. B. F.; LIMA NETO, I. E. (2019). *Poluição em sistemas de drenagem urbana. In: Terra - Habitats Urbanos e Rurais*. Org por: Giovanni Seabra. 1ed.Ituiutaba: Barlavento, p. 2260-2272.
- PACHECO, C. H. A; LIMA NETO, I. E. (2017). *Effect of Artificial Circulation on the Removal Kinetics of Cyanobacteria in a Hypereutrophic Shallow Lake*. Journal of Environmental Engineering, 143(12). DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001289
- RAI, P.K.; CHAHAR, B. R.; DHANYA, C. T. (2017). *Gis-Based for SWMM model for simulation the catchment response to flood events*. Hydrology Research, 48(2), 384-394. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.260>
- RJEILY. A.; ABBAS, O.; SADEK, M.; SHAHROUR, I.; CHEHADE, F. H. (2017). *Flood forecasting within urban drainage systems using NARX neural network*. Water Science & Technology, 76(7), 2401-2476. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.409>
- ROCHA, S. M. G.; MESQUITA, J. B. F.; LIMA NETO, I. E. (2020). *Modelagem hidrodinâmica e avaliação do decaimento do fósforo em um lago urbano hipereutrófico*. Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica, v. 13, n. 2, p. 530-545, 2020. <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.2.67679>.
- ROCHA, S. M. G.; MESQUITA, J. B. F.; LIMA NETO, I. E. (2019). *Análise e modelagem das relações entre nutrientes e fitoplâncton em reservatórios do Ceará*. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, v. 54, p. 134-147. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820190536>
- ROSSMAN, L. A. (2015). *Storm Water Management Model – User Manual Version 5.1*. Environmental Protection Agency (EPA): Office of Research and Development. EPA- 600/R-14/413b.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. B. (Org.). *Drenagem Urbana*. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1995, 428p.
- WARSTA, L.; NIEMI, T. J.; TAKA, M.; KREBS, G.; HAAHTI, K. KOIVUSALO, H.; KOKKONEN, T. (2017). *Development and application of an automated subcatchment generator for SWMM using open data*. Urban Water Journal, 14(9), 954-963. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2017.1325496>