

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MODALIDADE PROFISSIONAL

RELAÇÃO ENTRE CRESCIMENTO URBANO, DRENAGEM E ALAGAMENTOS: ESTUDO
HIDROLÓGICO APLICADO EM UM BAIRRO RESIDENCIAL

LAISE NOVELLINO NUNES DE SOUZA

MACAÉ-RJ

2021

LAISE NOVELLINO NUNES DE SOUZA

RELAÇÃO ENTRE CRESCIMENTO URBANO, DRENAGEM E ALAGAMENTOS: ESTUDO
HIDROLÓGICO APLICADO EM UM BAIRRO RESIDENCIAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, área de concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

Orientador: Dr. Jader Lugon Junior.

Co-orientador: Dr. Vicente de Paulo Santos de Oliveira

MACAÉ-RJ

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S729r Souza, Laise Novellino Nunes de, 1994-.
Relação entre crescimento urbano, drenagem e alagamentos: estudo hidrológico aplicado em um bairro residencial. / Laise Novellino Nunes de Souza. — Macaé, RJ, 2021.
x, 30 f.: il. color.|

Orientador: Jader Lugon Júnior, 1962-.
Coorientador: Vicente de Paulo Santos de Oliveira, 1965-.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Macaé, RJ, 2021.
Inclui referências.
Área de concentração: Sustentabilidade Regional.
Linha de Pesquisa: Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

1. escoamento urbano - Imboassica (Macaé, RJ). 2. Controle de inundações - Imboassica (Macaé, RJ). 3. Águas pluviais - Imboassica (Macaé, RJ). 4. Hidrologia urbana. 5. Drenagem - Imboassica (Macaé, RJ). 6. OpenFlows FLOOD (software) - modelagem computacional. I. Lugon Júnior, Jader, 1962-, orient. II. Oliveira, Vicente de Paulo Santos de, 1965-, coorient. III. Título.

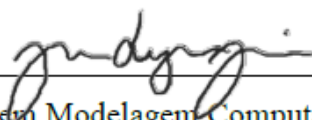
CDD 628.21098153

(23. ed.)

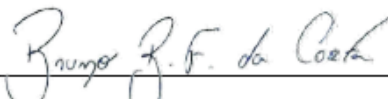
Dissertação de Mestrado intitulada **RELAÇÃO ENTRE CRESCIMENTO URBANO, DRENAGEM E ALAGAMENTOS: ESTUDO HIDROLÓGICO APLICADO EM UM BAIRRO RESIDENCIAL**, elaborado por **Laise Novellino Nunes de Souza** e apresentada, publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense - IFFluminense, na área concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

Aprovada em 29/06/2021

Banca Examinadora:



Jader Lugon Junior, Doutor em Modelagem Computacional pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), membro interno do Instituto Federal Fluminense (IFFluminense) – Orientador



Bruno Barzelay Ferreira da Costa, Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal Fluminense (UFF) – Membro externo



Wagner Rambaldi Telles, Doutor em Modelagem Computacional pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) – Membro externo



Nivaldo Silveira Ferreira, Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Membro externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho e toda a minha vida à Deus, que sempre me dá direcionamento e força para concluir os meus propósitos na vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Aos meus familiares, que me deram apoio durante toda a minha caminhada acadêmica e profissional.

Ao meu namorado, que sempre esteve comigo em todos os momentos.

A todos os amigos, e colegas de turma, que participaram de minha trajetória.

Ao meu professor orientador Jader Lugon Junior, pela paciência, apoio, atenção dedicada, disponibilidade e toda a contribuição nos trabalhos acadêmicos, que tem sido fundamental para chegar até aqui.

Ao meu professor co-orientador Vicente de Paulo Santos de Oliveira, e aos membros da banca, Bruno Barzellay Ferreira da Costa, Wagner Rambaldi Telles e Nivaldo Silveira Ferreira pelo interesse em participar deste trabalho, pela disponibilidade e atenção dedicada ao seu conteúdo.

À instituição Universidade Federal do Rio de Janeiro Campus Macaé e todos os membros que contribuíram para minha graduação.

À instituição Instituto Federal Fluminense, e aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense, por todo o empenho que me possibilitou chegar até aqui.

EPIÍGRAFE

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois, o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar” (Josué 1:9).

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Bacia de Drenagem do bairro Imboassica, Macaé..... | 18 |
| Figura 2: Mapa com a representação do Curve Number e Coeficiente de Manning adotados na simulação 2 e 5 para área urbanizada (desmatamento) em vinho e área vegetada (floresta) em azul..... | 21 |
| Figura 3: Quantidade de chuva acumulada no tempo..... | 22 |
| Figura 4: Comparação das simulações 1, 2 e 3 para um período de retorno de 10 anos no meio aproximado do canal..... | 23 |
| Figura 5: Comparação das simulações 1, 2 e 3 para um período de retorno de 10 anos no fim aproximado do canal..... | 24 |
| Figura 6: Comparação das simulações 4, 5 e 6 para um período de retorno de 10 anos no meio aproximado do canal..... | 25 |
| Figura 7: Comparação das simulações 4, 5 e 6 para um período de retorno de 10 anos no fim aproximado do canal..... | 25 |
| Figura 8: Comparação das simulações 1, 2 e 3 para um período de retorno de 50 anos no meio aproximado do canal..... | 26 |
| Figura 9: Comparação das simulações 1, 2 e 3 para um período de retorno de 50 anos no fim aproximado do canal..... | 27 |
| Figura 10: Comparação das simulações 4, 5 e 6 para um período de retorno de 50 anos no meio aproximado do canal..... | 27 |
| Figura 11: Comparação das simulações 4, 5 e 6 para um período de retorno de 50 anos no fim aproximado do canal..... | 28 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CN – Curve Number

DEM – Digital Elevation Model

MOHID – Water Modelling System

OpenFlows FLOOD – Software de Modelagem de Inundação Integrado

QGIS – Sistema de Informação Geográfica *Quantum*

TOPODATA – Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

SUDS – Sistema de Drenagem Urbana Sustentável

IFFluminense – Instituto Federal Fluminense

SIGABI – Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade

UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro

UFF – Universidade Federal Fluminense

RELAÇÃO ENTRE CRESCIMENTO URBANO, DRENAGEM E ALAGAMENTOS: ESTUDO HIDROLÓGICO APLICADO EM UM BAIRRO RESIDENCIAL

RESUMO

Tendo em vista a ocorrência frequente de inundações na cidade de Macaé, e a relação entre alagamentos, urbanização e a construção de tubulações de drenagem urbana, este trabalho objetivou a realização de um estudo sobre as técnicas de modelagem para se trabalhar a drenagem urbana e, posteriormente, aplicá-las no bairro Imboassica, localizado na cidade de Macaé. O método inclui uma revisão bibliográfica, o uso do software QGIS para categorização do solo da área de estudo e a utilização da plataforma MOHID contando com a interface do software OpenFlows FLOOD® para elaborar cenários com diferentes características de solo, e adotou-se duas topografias distintas. Na primeira avaliação foram feitas 3 simulações (1, 2 e 3) considerando a topografia natural do terreno, utilizando-se dados de altimetria obtidas a partir do projeto TOPODATA do INPE. Posteriormente, a cota de altitude representada no *Digital Elevation Model* (DEM) foi elevada em 10 metros nos locais correspondentes a localização das casas e 1 metro nas estradas do condomínio residencial e, então, foram refeitas as 3 simulações (4, 5, e 6). As seis simulações adotaram uma chuva de projeto de 10 anos de período de retorno. Por fim, mais seis simulações foram feitas tendo sido adotada uma chuva de 50 anos de período de retorno. Foi possível observar que nas simulações com a alteração nas elevações correspondentes às casas e à estrada, o valor calculado para a lâmina d'água aumenta nos canais de drenagem. O efeito das alterações no *Curve Number* foi observado na simulação do pico de cheia, que é reduzido conforme uma área maior é considerada como vegetada na simulação. E finalmente, foi possível observar o efeito da mudança no coeficiente de Manning, cujo aumento provocou um atraso do escoamento superficial.

Palavras-chave: Modelagem Computacional. OpenFlows FLOOD®. Coeficiente de Manning. Macaé. Bairro Imboassica.

**RELATION BETWEEN URBAN GROWTH, DRAINAGE AND FLOODS: STUDY OF
HYDROLOGY APPLIED TO A RESIDENTIAL DISTRICT**

ABSTRACT

In view of the frequent occurrence of floods in the city of Macaé, and the relation between flooding, urbanization and the construction of urban drainage ducts. This work aimed to make a study of the modeling techniques to work the urban drainage, and later to apply them in the Imboassica neighborhood, located in the city of Macaé. The method includes a literature review, use of the QGIS software to categorize the soil in the study area and the use of the OpenFlows FLOOD® software interface to create scenarios with different soil characteristics, and two different topographies were adopted. In the first evaluation, 3 simulations (1, 2 and 3) were made considering the natural topography of the terrain, using altimetry data obtained from the TOPODATA project at INPE. Then, the altitude elevation represented in the Digital Elevation Model (DEM) was increased by 10 meters at the locations corresponding to the location of the houses and 1 meter on the roads of the residential condominium, and then the 3 simulations (4, 5, and 6). The six simulations adopted a design rain of 10 years of return period. Finally, six more simulations were carried out, having adopted a 50-year rain return period. It was possible to observe that in the simulations with the change in the elevations corresponding to the houses and the road, the calculated value for the water depth increases in the drainage channels. The effect of the changes in the Curve Number was observed in the simulation of the flood peak, which is reduced as a larger area is considered as vegetated in the simulation. And finally, it was possible to observe the effect of the change in the Manning coefficient, whose increase caused a delay in the runoff.

Keywords: *Computational modeling. OpenFlows FLOOD®. Manning coefficient. Macaé. Imboassica neighborhood.*

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS..... | vii |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | vii |
| RESUMO..... | viii |
| ABSTRACT..... | ix |
| APRESENTAÇÃO..... | 1 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA APRESENTAÇÃO | 3 |
| ARTIGO CIENTÍFICO 1 | 5 |
| 1. INTRODUÇÃO | 5 |
| 2. OBJETIVO | 6 |
| 3. METODOLOGIA | 7 |
| 4. RESULTADOS..... | 7 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 10 |
| AGRADECIMENTOS..... | 11 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 11 |
| ARTIGO CIENTÍFICO 2 | 15 |
| 1. INTRODUÇÃO | 16 |
| 2. OBJETIVO | 17 |
| 3. METODOLOGIA | 18 |
| 4. RESULTADOS..... | 23 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 28 |
| AGRADECIMENTOS..... | 29 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 29 |

APRESENTAÇÃO

Os maiores problemas ambientais, sociais e econômicos estão concentrados nos grandes aglomerados humanos conhecidos como “megacidades”. Sendo estes problemas ainda mais evidentes nos países em desenvolvimento, devido à falta de recursos técnicos e financeiros para enfrentar a degradação ambiental gerada pela urbanização das grandes cidades. O saneamento básico dessas cidades brasileiras encontra-se muito incipiente no que diz respeito, principalmente, à coleta dos esgotos domésticos e à drenagem urbana (CANHOLI, 2015).

Doenças como a dengue se intensificaram em grandes cidades devido à inadequada infraestrutura de drenagem urbana, esgotamento sanitário, administração dos resíduos sólidos, ou seja, um mal planejamento do saneamento básico, além da desigualdade habitacional (CRUZ et al., 2013). Além disso, a urbanização desordenada aliada ao processo de desmatamento, aumenta significativamente o número de pessoas afetadas pelo processo de inundação (FERREIRA et al., 2019).

A drenagem urbana é definida como o sistema e os elementos que recolhem as águas pluviais precipitadas sobre uma determinada região, conduzindo-as, de forma segura, ao seu destino final. Seus objetivos incluem: a redução dos alagamentos, e minimização de prejuízos à comunidade instalada na região de interesse; a integração com o plano urbanístico da cidade, incluindo o zoneamento do uso do solo; preservação de áreas e integração de soluções de drenagem com paisagens urbanas, em combinações multifuncionais; compromisso com o destino final das águas de modo a não causar prejuízos a jusante (ZHOU, 2014; MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016; BOUARAFA et al., 2019).

Recentemente, foi aprovado o Novo Marco legal do Saneamento (Lei N° 14.026, de 15 de julho de 2020), onde espera-se que este gere investimentos no setor. Ele reafirma a definição de Saneamento Básico, prevista na Lei N° 11.445 de 15 de janeiro de 2007, como sendo composto pelos serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo das águas pluviais, limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos, e deve ser prestado considerando a universalização do acesso e a sua integração com os demais serviços de saneamento. Entretanto, diferentemente da legislação anterior, em seu Art. 2º é exigido que, além de garantir a universalização do acesso, deve ser garantida a efetiva prestação do serviço.

A drenagem urbana tem sido abordada na mídia de forma recente e, infelizmente, para noticiar questões trágicas de inundações em regiões urbanas. Este problema não é apenas regional, o Brasil tem apresentado incidência de inundações em diversas localidades, o que gera um prejuízo estimado de 1 bilhão de dólares anuais (TUCCI; HESPANHOL; NETTO, 2000).

Além do Brasil, países como China, Índia, Grécia e Indonésia têm sofrido inundações em áreas urbanas (LIAN et al., 2017; BATHRELLOS et al., 2018; JATMIKO, 2018; ANDIMUTHU et al., 2019), isso demonstra que a necessidade de planejamento em drenagem urbana aliado à urbanização é mundial. Levando em conta essa problemática, algumas pesquisas têm surgido com a proposta de trabalhar práticas mais sustentáveis (DINAMARCO; HADDAD; EVANGELISTA, 2016).

Junior e Mediondo (2015) analisaram a redução do escoamento superficial através da retenção de águas pluviais por trincheira de infiltração e telhado verde em um lote urbano. O estudo analisou 120 eventos e comparou o uso da técnica com seu não uso e obteve uma eficiência de retenção de 80% do escoamento superficial no lote analisado.

Vasconcelos, Miguez e Vazquez (2016) dimensionaram a redução de alagamentos em um lote com as seguintes medidas compensatórias: telhado verde, reservatório de lote e jardim rebaixado, e estudaram a possibilidade de inclusão de um pavimento permeável. Os autores concluíram que as medidas se tornaram eficientes principalmente para chuvas de pouca intensidade de precipitação e duração.

Por outro lado, a modelagem das redes de macrodrenagem, e da bacia hidrográfica, as quais tem como base equações matemáticas, possuem papel fundamental na gestão da drenagem urbana, pois permitem avaliar cenários e definir melhor seu planejamento. A simulação com base em modelos matemáticos hidrológicos e hidráulicos requer a solução de sistemas de equações, que demandam a utilização de ferramentas computacionais para o processamento dos cálculos e obtenção de uma resposta preditiva (CANHOLI, 2015).

Sendo assim, essa pesquisa tem por objetivo de melhorar o entendimento sobre a relação entre a urbanização e a presença de alagamentos, e contribuir para a mitigação destes eventos urbanos, mais especificamente, em Macaé.

Como objetivos específicos:

- 1) Investigar quais técnicas e modelos são aplicáveis na solução destes incidentes.

- 2) Criar simulações que se adequem às realidades locais em ocupação do solo e escoamento superficial da água.
- 3) Contribuir para a solução dos problemas locais ao estudar a drenagem urbana através da modelagem computacional em uma área específica da cidade de Macaé.

Desta forma, o presente trabalho foi dividido em dois artigos científicos, o Artigo Científico 1 trata de uma revisão da literatura sobre técnicas conhecidas de drenagem urbana sustentável e modelos de fenômenos hidrológicos que servem de subsídio para predições em drenagem urbana, ele foi submetido e apresentado no **9º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade**. Já o Artigo Científico 2 simulou a drenagem originada pela combinação da chuva com a impermeabilização do solo, devido à urbanização de um condomínio residencial e sua vizinhança, tendo em vista a preocupação dos moradores com os alagamentos ocorridos durante chuvas intensas na cidade de Macaé. Ele foi aprovado no **6º Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis**, evento associado a revista Ciência e Natura. O intuito da submissão do Artigo Científico 2 no evento é a divulgação do trabalho e debate com demais pesquisadores à cerca do tema, para à posteriori, submetê-lo na revista Ciência e Natura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA APRESENTAÇÃO

ANDIMUTHU, R. et al. Performance of urban storm drainage network under changing climate scenarios: Flood mitigation in Indian coastal city. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–10, 23 maio 2019.

BATHRELLOS, G. D. et al. Temporal and Spatial Analysis of Flood Occurrences in the Drainage Basin of Pinios River (Thessaly, Central Greece). **Land**, v. 7, n. 3, p. 106, 1 set. 2018.

BOUARAFA, S. et al. Hydrodynamic Characterization of Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS) by Using Beerkan Infiltration Experiments. **Water**, v. 11, n. 4, p. 660, 30 mar. 2019.

BRASIL. Presidência da República Federativa do Brasil. **Lei N° 14.026, de 15 de julho de 2020. Novo Marco Legal do Saneamento básico**. Disponível em: <planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14026.htm#:~:text=Atualiza%20o%20marco%20legal%20do,nome%20e%20as%20atribuições%20do> Acesso em: 03 de agosto de 2020.

BRASIL. Presidência da República Federativa do Brasil. **Lei N° 11.445, de 15 de janeiro de 2007. Diretrizes Nacionais para o Saneamento básico**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm> Acesso em: 03 de agosto de 2020.

- CANHOLI, A. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. [s.l.] Oficina de Textos, 2015.
- CRUZ, F. O. et al. **A saúde no Brasil em 2030: população e perfil sanitário - Vol. 2**. [s.l.] Saúde Brasil 2030, 2013.
- DINAMARCO, C.; HADDAD, A.; EVANGELISTA, A. Selo Casa Azul Certificação Ambiental Estudo De Caso: Condomínio Neo Niterói. **BLUE HOUSE SEAL ENVIRONMENTAL CERTIFICATION CASE STUDY: CONDOMINIUM NEO NITERÓI.**, v. 4, n. 1, p. 82–104, janeiro de 2016.
- FERREIRA, M. I. P. et al. **Engenharia & Ciências Ambientais: contribuições à gestão ecossistêmica**. Disponível em: <<http://essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/livros/article/view/978-85-99968-58-1/11492>>. Acesso em: 14 nov. 2019.
- JATMIKO, D. W. Hydraulics Performance of Coastal Flood Control in Madukoro Area, Semarang City, Indonesia. **Journal of the Civil Engineering Forum**, v. 4, n. 3, p. 189–200, 1 set. 2018.
- JR, A. A. O.; MENDIONDO, E. M. METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE EFICIÊNCIA DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS EM LOTE URBANO. **Revista Internacional de Ciências**, v. 5, n. 1, p. 29–41, 7 jul. 2015.
- LIAN, J. et al. Optimal management of the flooding risk caused by the joint occurrence of extreme rainfall and high tide level in a coastal city. **Natural Hazards**, v. 89, n. 1, p. 183–200, 1 out. 2017.
- MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. **Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. [s.l.] Elsevier, 2016.
- TUCCI, C.; HESPANHOL, I.; NETTO, O. CENÁRIOS DA GESTÃO DA ÁGUA NO BRASIL: uma contribuição para a -VISÃO MUNDIAL DA ÁGUA-. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 31–43, 2000.
- VASCONCELOS, A. F.; MIGUEZ, M. G.; VAZQUEZ, E. G. Critérios de projeto e benefícios esperados da implantação de técnicas compensatórias em drenagem urbana para controle de escoamentos na fonte, com base em modelagem computacional aplicada a um estudo de caso na zona oeste do Rio de Janeiro. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 655–662, 2016.
- ZHOU, Q. A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts. **Water**, v. 6, p. 976–992, 1 abr. 2014.



ARTIGO CIENTÍFICO 1

Artigo de Revisão Bibliográfica como requisito mínimo necessário para a qualificação que foi publicado no **9º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade** em conjunto com a banca avaliadora. Este evento exige um máximo de 10 páginas, não pede resumo ou palavras-chave e apresenta formato para legenda e referências próprias, não segue a ABNT. Os anais do evento podem ser consultados em: <<https://itr.ufrj.br/sigabi/anais/>>.

APLICAÇÃO DE MODELAGEM DE FENÔMENOS HIDROLÓGICOS NA ADOÇÃO DE TÉCNICAS DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL

WATER MODELING APPLICATION IN THE ADOPTION OF SUSTAINABLE URBAN DRAINAGE TECHNIQUES

Laise Novellino Nunes de Souza
Vicente de Paulo Santos de Oliveira
Bruno Barzellay Ferreira da Costa
Wagner Rambaldi Telles
Nivaldo Silveira Ferreira
Jader Lugon Junior

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Banco Mundial, a população urbana na China já está em 60%. No Brasil, em 87% (The World Bank 2019). O continente Africano por sua vez, apresentou uma taxa de urbanização média de 37% em 2014 (Ebeke & Ntsama Etoundi 2017). Aproximadamente 54% da população mundial mora em áreas urbanas, e é esperado que esse valor cresça para 66% em 2050 (Andimuthu et al. 2019).

A expansão da malha urbana transformou áreas de terras cultivadas, pastagens e florestas em áreas construídas com superfícies impermeáveis. Estas cobrem aproximadamente 1,3% e 9% das áreas terrestres dos Estados Unidos e Europa, respectivamente (Scalenghe & Marsan 2009, YAN et al. 2015, De Colstoun et al. 2019). Globalmente, a China possui maior área de superfícies impermeáveis (Yan et al. 2015), que cobre aproximadamente 63% de suas terras (Elvidge et al. 2007), tendo essas áreas nos anos de 2000 a 2008 aumentado 53,3% (Kuang et al. 2013, Yan et al. 2015). Algumas consequências da urbanização podem ser vistas, países como o Brasil, a China, a Índia, a Grécia e a Indonésia têm sofrido inundações em áreas urbanas (Silva et al. 2010, Lian et al. 2017, Barthellos et al. 2018, Jatmiko 2018, Andimuthu et al. 2019), isso demonstra que a necessidade de planejamento em drenagem urbana aliado à urbanização é mundial.

A drenagem urbana é uma técnica de engenharia para captar e direcionar a água das chuvas, que não será capaz de infiltrar no solo devido à sua impermeabilização. Entretanto, busca apenas transferir o acúmulo de água para outra região, que pode não estar preparada para recebê-la (Bouarafa et al. 2019).

Apesar da crença de que a tecnologia resolverá as necessidades da manutenção da vida humana no futuro, é importante pensar na conservação do meio ambiente, de modo que não seja necessário criar soluções para questões que poderiam ter sido evitadas. A drenagem urbana sustentável propõe mitigar os impactos da urbanização no ciclo hidrológico, na maioria das vezes por meio da infiltração, e diminuir o volume de água que é direcionada aos canais (Bouarafa et al. 2019). As técnicas de drenagem sustentável são altamente recomendadas e aplicadas em diversas partes do mundo, onde a terminologia varia de acordo com a região, apresentando os mesmos fundamentos (Zhou 2014).

Na Europa, o Sistema de Drenagem Urbana Sustentável é conhecido pela sigla SUDS, e é usado com foco na manutenção da saúde pública, proteção dos recursos hídricos naturais, e diversidade biológica para as necessidades futuras (Hellstrom et al. 2000, Willems et al. 2012, Zhou 2014). Na Austrália, por sua vez, o termo Design Urbano Sensível a Água, conhecido pela sigla WSUD, é principalmente utilizado para se referir ao planejamento e engenharia que visam integrar de maneira sustentável a água na paisagem urbana, minimizar a degradação ambiental e alcançar uma harmonia entre os corpos hídricos e as cidades (Roy et al. 2008, Zhou 2014). O mesmo termo nos Estados Unidos e no Canadá é conhecido como Desenvolvimento de Baixo Impacto e descreve uma abordagem de integração de processos naturais com o meio urbano para recriar e conservar ecossistemas de gestão da água, buscando em pequena escala uma conservação hidrológica para mitigar os diversos impactos da urbanização (Dietz 2007, Elliott & Trowsdale 2007, Zhou 2014).

Na Nova Zelândia essas práticas são chamadas de Design e Desenvolvimento de Baixo Impacto Urbano, e Dinamarca e a Holanda tem promovido projetos de transformação do meio urbano conhecidos como Água nas Áreas Urbanas que compõem áreas de drenagem sustentável (Zhou 2014). Na Suécia essas práticas são conhecidas como Gestão Sustentável da Água no Meio Urbano que visam a proteção dos recursos hídricos nas áreas urbanas (Hellstrom et al. 2000, Zhou, 2014).

Podemos dividir a drenagem urbana em medidas estruturais e não-estruturais. As medidas estruturais são as mais conhecidas e utilizadas, mas cada vez se torna mais comum o uso de medidas não-estruturais, devido a uma mobilização global para se ter soluções ecológicas na mitigação do escoamento de águas pluviais (Uvini Srishantha & Upaka Rathnayake 2017). A drenagem urbana sustentável altera o sistema de engenharia tradicionalmente ligado às tubulações. Podemos defini-la como as práticas e sistemas que usam e aprimoram os sistemas naturais, isto é, infiltração, evapotranspiração, filtração, retenção e reuso (Uvini Srishantha & Upaka Rathnayake 2017). Esta prática, se planejada com cautela e olhar técnico, pode se incorporar à infraestrutura verde urbana, adicionando à cidade valores estéticos, sociais e ambientais, adaptando o ambiente urbano para atender às mudanças climáticas e promovendo um desenvolvimento mais sustentável (Zhou et al. 2013).

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é trazer um panorama das pesquisas à cerca das técnicas de drenagem urbana sustentável, e dos modelos computacionais disponíveis para auxiliar na tomada de decisão.

Os objetivos específicos são:

- 1) Realizar um levantamento sistemático das principais técnicas utilizadas em projetos de drenagem urbana, o que já foi estudado sobre o tema, as regiões onde as técnicas de drenagem urbana sustentável foram aplicadas e demais avanços na área.
- 2) Listar os modelos hidrológicos aplicados por profissionais da engenharia para subsidiar o planejamento mais eficaz, bem como descrever suas funcionalidades.

3. METODOLOGIA

A pesquisa consistiu em uma revisão sistemática no Periódicos Capes das técnicas de drenagem urbana sustentável conhecidas na literatura. Para localizar artigos sobre técnicas de drenagem, foram pesquisadas as palavras “*rainfall*”, “*drainage*”, “*infiltration*”, “*flood*”, “*coastal*”, e “drenagem urbana” na busca sem definição de base específica. Utilizou-se o acesso do Instituto Federal Fluminense através do Periódicos Capes. Os artigos encontrados foram eliminados a partir do seguinte critério: primeiro pelo conteúdo do título, em seguida pelo resumo, e, por último, após a leitura do texto. Em complemento, se fez uso de livros didáticos disponíveis aos autores. Por fim, foram elaboradas as listas com as características das técnicas de drenagem sustentável comentadas na Seção 4.1.

De modo a auxiliar na melhor escolha da técnica de drenagem urbana, foram listados os recursos de modelagem computacional utilizados para simulações hídricas na Seção 4.2. Os artigos de modelagem foram pesquisados usando o nome do próprio software como palavra-chave de pesquisa. Eles foram selecionados a partir do conhecimento prévio dos autores do artigo.

4. RESULTADOS

4.1 Técnicas de Drenagem Urbana Sustentável

Algumas técnicas já consolidadas são: a criação de lagos, ou espaços verdes, que promovam a transformação da paisagem urbana. Outras estratégias são as trincheiras de infiltração, canais de drenagem, jardins filtrantes, e telhados verdes, que quando projetados corretamente, podem servir tanto como locais de experiência recreativa, quanto para acumular temporariamente a água da chuva em eventos de chuva extrema (Zhou et al. 2013).

As técnicas de drenagem sustentável tornaram-se uma forma eficaz de se aproximar do ciclo hidrológico natural da região anterior à urbanização. Entre essas técnicas, pode-se citar a captação de águas pluviais para diversos usos, os pavimentos permeáveis e os tetos verdes (Rodríguez-Sinobas et al. 2018).

Os pavimentos permeáveis (conhecido como *permeable pavements* no Reino Unido, e *pervious paving* na América do Norte) são considerados como um sistema de drenagem sustentável de bom custo-benefício que reduz o escoamento das águas pluviais, reduzindo as inundações localizadas. Ele consiste em um sistema composto por uma cobertura de concreto permeável na camada superior, e uma subcamada composta de agregados grossos. O concreto deve apresentar uma porosidade de 15 a 35% de modo que permita a rápida percolação da água. Na prática existem muitas variações de espessura e composição da camada, mas todas têm o objetivo de armazenar a água das chuvas até que se infiltre no solo ou seja drenado. Ele pode ser projetado para infiltração total, parcial ou somente para armazenagem, nos dois últimos casos, o solo apresenta drenos que irão direcionar a água (Kia et al. 2017).

Na cidade de Chicago, os tetos verdes criaram um habitat para comunidades de abelhas dentro do ambiente urbano (Tonietto et al. 2011). Os tetos verdes se tornaram obrigatórios para novos edifícios de topos planos de algumas cidades, isso gerou um aumento considerável na apicultura urbana. Esse aumento de conectividade entre as cidades e o habitat de abelhas foi observado na Ásia, Europa e América do Norte (Hofmann & Renner 2018).

A legislação que tornou obrigatória a presença de tetos verdes é uma medida não-estrutural, enquanto o teto verde em si é uma medida estrutural de drenagem urbana sustentável. No Brasil, essa técnica foi estudada com o objetivo de diminuir a presença do mosquito *Aedes Aegypti* (Muller et al 2018).

No Brasil todas essas técnicas são conhecidas, principalmente por estudiosos da área, pois estão presentes em livros didáticos voltados à drenagem urbana (Canholi 2015, Miguez et al. 2016), e algumas pesquisas tem sido feitas na busca de estudar sua aplicabilidade em diversas regiões geográficas brasileiras. Pode-se citar o projeto “Manejo de águas pluviais em meio urbano” que une diversas universidades brasileiras de modo a possibilitar o compartilhamento de conhecimentos em modelagem de processos, monitoramento e identificação de impactos, com o desenvolvimento de tecnologias para o manejo e gestão de águas pluviais, modelagem de sistemas de drenagem e desenvolvimento de técnicas compensatórias em drenagem urbana (Souza 2013).

A cidade de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, apresenta uma bacia de detenção como técnica de minimização da cheia em dia de chuva intensa na cidade (Battemarco et al. 2018) e na cidade de Natal, no Rio Grande do Norte, existem lagoas de infiltração que atuam como grande reservatórios em períodos de cheia (Rocha & Ribeiro 2018). As técnicas de drenagem urbana sustentável podem estar presentes no paisagismo urbano mesmo não tendo sido propositais, por exemplo, na cidade de Macaé, estado do Rio de Janeiro. Em dias de chuva intensa, o Parque da Cidade de Macaé fica cheio de água por ser uma região baixa, o que diminui a água escoada para os canais de drenagem. Entretanto, o Parque da Cidade mesmo servindo como bacia de detenção, não foi planejado para tal, sendo assim, não consegue suportar a demanda hídrica necessária, e muitas vezes a água extravasa e atinge as regiões ao redor do Parque da Cidade, gerando transtornos. De fato, os transtornos seriam ainda maiores se parte da água não ficasse retida na região citada. Por isso, mesmo não tendo a capacidade volumétrica necessária para impedir alagamentos, é considerado uma bacia de detenção.

Alguns autores têm estudado a possibilidade de implementação de técnicas de drenagem urbana sustentável em cidades que sofrem inundações, como a cidade do Rio de Janeiro, no estado do Rio de Janeiro (Battemarco et al. 2018), e em Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais (Silva et al. 2010). Tais técnicas incluem as bacias de detenção, jardins filtrantes, trincheiras de infiltração, valas de drenagem, e pavimentos permeáveis. Outras pesquisas se concentram em tratar a drenagem em escala mais reduzida, propondo soluções dentro de lotes residenciais (Vasconcelos et al. 2016). Assim, para resumir e explicar melhor, algumas técnicas foram listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Técnicas conhecidas em drenagem urbana sustentável.

| Técnicas | Características | Referências |
|---------------------------------------|---|--|
| Estruturais | | |
| Lagos naturais | No controle de cheias, pequenos lagos temporários ou permanentes retêm a água da chuva diminuindo o escoamento superficial. | (Zhou et al. 2013, Miguez et al. 2016) |
| Trincheiras de infiltração/percolação | São pequenas valas preenchidas com material granular para infiltração e/ou filtração e detenção do escoamento superficial. | (Zhou et al. 2013, Canholi 2015, Miguez et al. 2016) |
| Canais/Valas de drenagem | Estruturas longilíneas utilizadas ao longo de estradas ou conjuntos habitacionais para concentrar o fluxo de águas adjacentes, e criar condições para infiltração ao longo do seu comprimento. | (Zhou et al. 2013, Canholi 2015, Miguez et al. 2016) |
| Jardins filtrantes | Locais com solo coberto por vegetação que permitem a infiltração da água no terreno. | (Zhou et al. 2013, Canholi 2015, Miguez et al. 2016) |
| Telhados verdes | Técnica de engenharia e arquitetura que aplica vegetação sobre solo ou substrato instalado sobre a cobertura de edificações. | (Tonietto et al. 2011, Zhou et al. 2013, Canholi 2015) |
| Captação de águas pluviais | Consistem em pequenos reservatórios localizados em lotes residenciais ou comerciais que diminuem a sobrecarga da rede de drenagem em dias de chuva. | (Miguez et al. 2016, Rodríguez-Sinobas et al. 2018) |
| Pavimentos permeáveis/porosos | São constituídos normalmente de asfalto ou concreto convencionais, dos quais foram retiradas as partículas mais finas. | (Canholi, 2015, Kia et al. 2017) |
| Não-Estruturais | | |
| Legislações | Ao contrário das medidas estruturais que atuam fisicamente sobre os fenômenos de formação dos alagamentos, o objetivo das medidas não-estruturais é reduzir a exposição da sociedade e dos sistemas econômicos às inundações. As legislações, como as que definem percentuais de ocupação no lote ou a inserção obrigatória de telhados verdes, fazem parte dessas medidas. | (Miguez et al. 2016, Hofmann & Renner 2018) |

Fonte: Elaborado pelos autores

4.2 Modelagem Aplicada à Recursos Hídricos

Para o planejamento, é necessário incorporar modelos com capacidades preditivas que gerem resultados quantitativos, pois irão permitir mensurar a resposta dos efeitos de cada cenário e técnica antes de sua aplicação, auxiliando na tomada de decisão quanto à seleção dos tipos de drenagem urbana mais eficientes. Com esses modelos é possível simular as técnicas de drenagem sustentável que melhor irão se comportar através dos prognósticos do sistema. Muitos modelos são apresentados na literatura (Zhou 2014), sendo selecionados e apresentados alguns destes na Tabela 2.

Tabela 2: Revisão de modelos aplicados à recursos hídricos.

| Programas | Características | Referências |
|--|---|--|
| Modelos de fenômenos Hidrológicos | | |
| Flo-2D | O Flo-2D simula o fluxo hídrico carregado com detritos. É muito utilizado para prever desastres ambientais. | (Lin et al. 2011, Stancanelli et al. 2017) |
| HEC-HMS, HEC-HAS | A plataforma <i>Hydrologic Engineering Center</i> (HEC) possui diferentes módulos que permitem realizar simulações para variadas finalidades em gerenciamento de recursos hídricos. Apresenta o módulo Hidrológico HMS e Hidráulico RAS. | (Canholi 2015, Tavares et al. 2018) |
| HidroBacia | O modelo HidroBacia possibilita a estimação do hidrograma de escoamento superficial em qualquer posição de uma bacia hidrográfica (declividade variada), mesmo para condições de umidade diferentes da saturação. | (Zanetti et al. 2009) |
| IBER | O modelo IBER trabalha com diferentes módulos de cálculo, o módulo hidrodinâmico para determinar a profundidade e velocidade da água, o módulo de turbulência e o módulo de transporte de sedimentos. | (Martins et al. 2018, 2019) |
| MOHID Land, MOHID Water | No MOHID Land, diferentes processos que ocorrem em uma bacia são programados em diferentes módulos, os processos simulados, podem ser fluxo superficial 2D, transporte de rede de drenagem 1D e infiltração 3D e transporte em meios porosos saturados e insaturados. O MOHID Water calcula as seguintes variáveis: nível do mar, velocidade atual e fluxos de água. Funciona com um modelo tridimensional baroclínico de dados de entrada como mudanças de maré e velocidade do vento. | (Paiva et al. 2017, Telles et al. 2017) |
| SWMM | A plataforma <i>Storm Water Management Model</i> (SWMM) é um software hidrológico-hidráulico desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos para modelagem e simulação do escoamento superficial em áreas urbanas | (Canholi 2015, Tavares et al. 2018) |
| Modelagem da precipitação | | |
| CLIMABR | O CLIMABR gera séries sintéticas de precipitação, e permite, além da obtenção de informações sobre a precipitação, a geração do respectivo perfil. | (Oliveira et al. 2005a, 2005b) |
| ETA | O modelo ETA é um modelo numérico de previsão do tempo de curto e longo prazo com a capacidade de captar os processos físicos da atmosfera | (Moura et al. 2010) |
| WRF | O <i>Weather Research and Forecasting</i> (WRF) é um modelo atmosférico muito utilizado por pesquisadores em diversas regiões do mundo para pesquisa e previsão numérica do tempo. | (Silva et al. 2016) |

Fonte: Elaborado pelos autores

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considera-se que o objetivo do trabalho foi alcançado, pois pode-se listar as técnicas de drenagem e suas características. Observou-se que as regiões que as utilizam ultrapassam os limites do território brasileiro, sendo adotadas mundialmente. Existe diversas pesquisas acerca do tema,

entretanto, muitos locais ainda não exploraram essas possibilidades em seus territórios, ou então, apresentam dispositivos de drenagem em sua paisagem sem observá-los como tal.

Com essa pesquisa, pôde-se listar diversos modelos de fenômenos hidrológicos para suporte ao planejamento de drenagem e entender melhor suas funcionalidades. Espera-se que este trabalho auxilie na escolha do melhor método para que, aliando uma boa técnica de modelagem com projetos de drenagem urbana sustentável, torne-se possível garantir a segurança pública e criar um ambiente que minimize os efeitos da urbanização.

Futuramente, será necessário fazer atualizações nos resultados apresentados nesta pesquisa, de modo a incorporar novas técnicas de drenagem urbana e modelos computacionais. Isso é importante para que os pesquisadores, que pretendem aplicar técnicas de drenagem urbana sustentável com o recurso da modelagem de fenômeno hidrológico, tenham uma listagem atualizada de consulta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte da FAPERJ, Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, do CNPq, Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e da CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Educação de Nível Superior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andimuthu R, Kandasamy P, Mudgal BV, Jeganathan A, Balu A, Sankar G (2019) Performance of urban storm drainage network under changing climate scenarios: Flood mitigation in Indian coastal city. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–10, 23 maio 2019.

Bathrellos GD, Skilodimou HD, Soukis K, Koskeridou E (2018) Temporal and Spatial Analysis of Flood Occurrences in the Drainage Basin of Pinios River (Thessaly, Central Greece). **Land**, v. 7, n. 3, p. 106, 1 set. 2018.

Battemarco BP, Yamamoto LMT, Verol AP, Rego AQ, Vasconcellos VMN, Miguez MG (2018) Sistemas de espaços livres e drenagem urbana. **Paisagem e Ambiente**, n. 42, 1 dez. 2018.

Bourafa S, Lassabatere L, Lipeme-Kouyi G, Angulo-Jaramillo R (2019) Hydrodynamic Characterization of Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS) by Using Beerkan Infiltration Experiments. **Water**, v. 11, n. 4, p. 660, 30 mar. 2019.

Canholi A (2015) **Drenagem urbana e controle de enchentes**. [s.l.] Oficina de Textos, 2015.

De Colstoun EB, Huang C, Wolfe R, Tilton J, Tan B, Simith S, Phillips J, Wang P, Ling PY, Zhan J, Li S, Taylor M (2019) Mapping Impervious Surfaces Globally at 30m Resolution Using Global Land Survey Data. p. 2, 2019.

Dietz ME (2007) Low Impact Development Practices: A Review of Current Research and Recommendations for Future Directions. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 186, n. 1, p. 351–363, 1 nov. 2007.

Ebeke CH, Ntsama Etoundi SM (2017) The Effects of Natural Resources on Urbanization, Concentration, and Living Standards in Africa. **World Development**, v. 96, p. 408–417, ago. 2017.

Elliott A, Trowsdale S (2007) A review of models for low impact urban stormwater drainage. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 3, p. 394–405, mar. 2007.

Elvidge CD, Tuttle BT, Sutton PC, Baugh KE, Howard AT, Milesi C, Bhaduri BL, Nemani R (2007) Global Distribution and Density of Constructed Impervious Surfaces. **Sensors**, v. 7, n. 9, p. 1962–1979, set. 2007.

Hellstrom D, Jeppsson U, Karrman E (2000) A framework for systems analysis of sustainable urban water management. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 20, n. 3, p. 311–321, jun. 2000.

Hofmann MM, Renner SS (2018) Bee species recorded between 1992 and 2017 from green roofs in Asia, Europe, and North America, with key characteristics and open research questions. **Apidologie**, v. 49, n. 3, p. 307–313, 1 jun. 2018.

Jatmiko DW (2018) Hydraulics Performance of Coastal Flood Control in Madukoro Area, Semarang City, Indonesia. **Journal of the Civil Engineering Forum**, v. 4, n. 3, p. 189–200, 1 set. 2018.

Kia A, Wong HS, Cheeseman CR (2017) Clogging in permeable concrete: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 221–233, maio 2017.

Kuang WH, Liu JY, Zhang ZX, Lu DS, Xiang B (2013) Spatiotemporal dynamics of impervious surface areas across China during the early 21st century. **Chinese Science Bulletin**, v. 58, n. 14, p. 1691–1701, 1 maio 2013.

Lian J, Xu H, Xu K, Ma C (2017) Optimal management of the flooding risk caused by the joint occurrence of extreme rainfall and high tide level in a coastal city. **Natural Hazards**, v. 89, n. 1, p. 183–200, 1 out. 2017.

Lin JY, Yang MD, Lin BR, Lin PS (2011) Risk assessment of debris flows in Songhe Stream, Taiwan. **Engineering Geology**, v. 123, n. 1–2, p. 100–112, nov. 2011.

Martins M, Gomes AA, Santos PP (2018) Hydraulic modeling for the assessment of flood hazard using the Iber software in the Amarante urban center. 2018.

Martins M, Gomes AA, Santos PP (2019) Delimitação de áreas inundáveis no centro urbano de Amarante, norte de Portugal, utilizando o software IBER. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 1, p. 185–200, 2019.

Miguez MG, Veról AP, Rezende OM (2016) **Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. [s.l.] Elsevier, 2016.

Moura RG, Herdies DL, Mendes D, Mendes MCD (2010) Avaliação do modelo regional eta utilizando as análises do CPTEC e NCEP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 1, p. 46–53, mar. 2010.

Muller JTRV, Oliveira TD, Muller GA (2018) O USO DE TELHADOS VERDES CONTRA O AEDES AEGYPTI. **MIX Sustentável**, v. 4, n. 3, p. 61–66, 24 out. 2018.

Oliveira VPS, Zanetti SS, Pruski FF (2005) CLIMABR parte I: modelo para a geração de séries sintéticas de precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 348–355, set. 2005a.

Oliveira VPS, Zanetti SS, Pruski FF (2005) CLIMABR parte II: geração do perfil de precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 356–363, set. 2005b.

Paiva PM, Lugon Junior J, Barreto AN, Silva JAF, Silva Neto AJ (2017) Comparing 3d and 2d computational modeling of an oil well blowout using MOHID platform - A case study in the Campos Basin. **Science of The Total Environment**, v. 595, p. 633–641, out. 2017.

Rocha LLL, Ribeiro RJC (2018) Reservatórios de detenção e infiltração de águas pluviais: uma análise sob a ótica urbana. **Paranoá: Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, n. 22, p. 16–31, 1 dez. 2018.

Rodríguez-Sinobas L, Zubelzu S, Perales-Momparler S, Canogar S (2018) Techniques and criteria for sustainable urban stormwater management. The case study of Valdebebas (Madrid, Spain). **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 402–416, jan. 2018.

Roy AH, Wenger SJ, Fletcher TD, Walsh CJ, Ladson AR, Shuster WD, Thurston HW, Brown RR (2008). Impediments and Solutions to Sustainable, Watershed-Scale Urban Stormwater Management: Lessons from Australia and the United States. **Environmental Management**, v. 42, n. 2, p. 344–359, 1 ago. 2008.

Scalenghe R, Marsan FA (2009) The anthropogenic sealing of soils in urban areas. **Landscape and Urban Planning**, v. 90, n. 1–2, p. 1–10, mar. 2009.

Silva A, Nascimento N, Seidl M, Vieira L (2010) SWITCH in Belo Horizonte, Brazil: infiltration and detention systems for more sustainable stormwater control in Belo Horizonte. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 9, n. 1, p. 7–13, 1 mar. 2010.

Silva FP, Silva MG AJ, Menezes WF, Almeida VA (2016) Atmospheric Indicators Evaluation Using WRF Numerical Model in Rainfall Events in the City of Rio de Janeiro. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 38, n. 2, p. 81, 16 fev. 2016.

Souza VCB (2013) GESTÃO DA DRENAGEM URBANA NO BRASIL: DESAFIOS PARA A SUSTENTABILIDADE. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 1, n. 1, p. 58–72, 1 mar. 2013.

Stancanelli LM, Peres DJ, Cancelliere A, Foti E (2017) A combined triggering-propagation modeling approach for the assessment of rainfall induced debris flow susceptibility. **Journal of Hydrology**, v. 550, p. 130–143, jul. 2017.

Tavares LPS, Lugon Junior J, Silva JAF, Wasserman JC, Rodrigues PPGW (2019) WATER MANAGEMENT AND URBAN FLOOD MITIGATION: STUDIES AND PROPOSALS FOR THE MACAÉ RIVER BASIN IN BRAZIL. **Journal of Urban and Environmental Engineering**. Disponível em: <<https://periodicos.ufpb.br/ojs2/index.php/juee/article/view/41313/22546>>. Acesso em: 27 out. 2019.

Telles WR, Rodrigues PPGW, Silva Neto AJ (2017) Calibração automática da plataforma MOHID empregando um método estocástico de otimização e dados reais de um evento climático extremo em Nova Friburgo-RJ: parte 1 – preparação do modelo digital do terreno e aquisição dos dados experimentais de precipitação e nível. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, v. 33, n. 3–4, p. 164–170, jul. 2017.

The World Bank. **Urban population (% of total population) | Data**. Disponível em: <<https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS>>. Acesso em: 21 set. 2020.

Tonietto R, Fant J, Ascher J, Ellis K, Larkin D (2011) A comparison of bee communities of Chicago green roofs, parks and prairies. **Landscape and Urban Planning**, v. 103, n. 1, p. 102–108, out. 2011.

Uvini Srishantha, Upaka Rathnayake (2017) Sustainable urban drainage systems (SUDS) what it is and where do we stand today? **Engineering and Applied Science Research**, v. 44, p. 4, 2017.

Vasconcelos AF, Miguez MG, Vazquez EG (2016) Critérios de projeto e benefícios esperados da implantação de técnicas compensatórias em drenagem urbana para controle de escoamentos na fonte, com base em modelagem computacional aplicada a um estudo de caso na zona oeste do Rio de Janeiro. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 655–662, 2016.

Willems P, K Arnbjerg-Nielsen, Olsson J, Nguyen VTV (2012) Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. **Atmospheric Research**, v. 103, p. 106–118, jan. 2012.

Yan Y, Kuang W, Zhang C, Chen C (2015) Impacts of impervious surface expansion on soil organic carbon – a spatially explicit study. **Scientific Reports**, v. 5, p. 17905, 8 dez. 2015.

Zanetti SS, Silva JMA, Sousa EF, Oliveira VPS, Almeida FT (2009) Modelagem hidrológica em microbacia hidrográfica parte I: aprimoramento do modelo HidroBacia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 429–434, ago. 2009.

Zhou Q, Panduro TE, Thorsen BJ, Arnbjerg-Nielsen K (2013) Adaption to Extreme Rainfall with Open Urban Drainage System: An Integrated Hydrological Cost-Benefit Analysis. **Environmental Management**, v. 51, n. 3, p. 586–601, 1 mar. 2013.

Zhou Q (2014) A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts. **Water**, v. 6, p. 976–992, 1 abr. 2014.



ARTIGO CIENTÍFICO 2

Artigo de Comunicação aprovado no **6º Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis**, evento associado a revista *Ciência e Natura*.

ESTUDO DO IMPACTO HIDROLÓGICO DO CRESCIMENTO DE UM BAIRRO RESIDENCIAL NA DRENAGEM URBANA DA CIDADE DE MACAÉ, RIO DE JANEIRO, BRASIL

SENSITIVITY STUDY OF THE HYDROLOGICAL IMPACT OF THE GROWTH OF A RESIDENTIAL NEIGHBORHOOD IN THE URBAN DRAINAGE OF THE CITY OF MACAÉ, RIO DE JANEIRO, BRAZIL

Laise Novellino Nunes de Souza

Jader Lugon Junior

RESUMO

Este trabalho teve o objetivo de estudar o sistema de drenagem de um bairro residencial por meio de um estudo de caso. Assim, foi realizada uma análise de sensibilidade da drenagem considerando o avanço do processo de urbanização no bairro Imboassica, no município de Macaé, Rio de Janeiro. Foi possível avaliar a resposta do modelo para diferentes condições de uso do solo, representados com variações no coeficiente de Manning e também de *Curve Number*. Foi utilizada a plataforma MOHID contando com a interface do software OpenFlows FLOOD® para elaborar cenários com diferentes características de solo, e adotou-se duas topografias distintas. Na primeira avaliação foram feitas 3 simulações (1, 2 e 3) considerando a topografia natural do terreno, utilizando-se dados de altimetria obtidas a partir do projeto TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A seguir, a cota de altitude representada no *Digital Elevation Model* (DEM) foi elevada em 10 metros nos locais correspondentes a localização das casas e 1 metro nas estradas do condomínio residencial e, então, foram refeitas as 3 simulações (4, 5, e 6). As seis simulações adotaram uma chuva de projeto de 10 anos de período de retorno. Por fim, mais seis simulações foram feitas tendo sido adotada uma chuva de 50 anos de período de retorno. Foi possível observar que nas simulações com a alteração nas elevações correspondentes às casas e à estrada, o valor calculado para a lâmina d'água aumenta nos canais de drenagem. O efeito das alterações no *Curve Number* foi observado na simulação do pico de cheia, que é reduzido conforme uma área maior é considerada como coberta de vegetação na simulação. E finalmente, foi possível observar o efeito da mudança no coeficiente de Manning, cujo aumento provocou um atraso do escoamento superficial.

PALAVRA CHAVE: OpenFlows; Chuva de Projeto; Infiltração.

ABSTRACT

This work aimed to study the drainage system of a residential neighborhood through a case study. Thus, a drainage sensitivity analysis was carried out considering the progress of the urbanization process in the Imboassica neighborhood, in the municipality of Macaé, Rio de Janeiro. It was possible to evaluate the model's response to different land use conditions, represented with variations in the Manning coefficient and also in the Curve Number. The MOHID platform was used with the OpenFlows FLOOD® software interface to create scenarios with different soil characteristics, and two different topographies were adopted. In the first evaluation, 3 simulations (1, 2 and 3) were made considering the natural topography of the terrain, using altimetry data obtained from the TOPODATA project at INPE. Then, the altitude elevation represented in the Digital Elevation Model (DEM) was increased by 10 meters at the locations corresponding to the location of the houses and 1 meter on the roads of the residential condominium, and then the 3 simulations (4, 5, and 6). The six simulations adopted a design rain of 10 years of return period. Finally, six more simulations were carried out, having adopted a 50-year rain return period. It was possible to observe that in the simulations with the change in the elevations corresponding to the houses and the road, the calculated value for the water depth increases in the drainage channels. The effect of the changes in the Curve Number was observed in the simulation of the flood peak, which is reduced as a larger area is considered as vegetated in the simulation. And finally, it was possible to observe the effect of the change in the Manning coefficient, whose increase caused a delay in the runoff.

KEY WORDS: *OpenFlows; Design Rain; Infiltration.*

1. INTRODUÇÃO

A gestão da rede de águas pluviais é um dos aspectos mais importantes das cidades desenvolvidas devido às mudanças na permeabilidade da superfície da terra e a percolação da água. O crescimento urbano tende a aumentar as superfícies impermeáveis devido a construção de estradas e edifícios. Essas áreas impermeáveis, por sua vez, geram acúmulo de água na superfície, que ocasionam as inundações urbanas (ABD-ELHAMID et al., 2020).

A urbanização altera drasticamente a dinâmica hidrológica de cidades costeiras. As construções criam superfícies impermeáveis estendidas em solos permeáveis arenosos, conseqüentemente dificultando a recarga pluvial dos aquíferos e aumentando retenção de água superficial (GARZO; DADON; CASTRO, 2019).

A evapotranspiração, a infiltração e a interceptação da água diminuiram após as árvores e outras plantas serem desmatadas no processo desenvolvimento. A maior parte da água da chuva é

transportada para fora das regiões urbanas através do sistema de drenagem urbana e, finalmente, despejada em rios. Os rios tendem a receber maior quantidade de água na estação chuvosa, resultando em inundações frequentes. Mas devido à pouca recarga do lençol freático, pode ficar mais seco nos outros períodos do ano (SURIPIN et al., 2018).

A cidade de Macaé tem sofrido com ocorrência de inundações repentinas, e por isso, considera-se um local adequado para a realização de estudos visando a mitigação de cheias urbanas (TAVARES et al., 2018). O bairro Imboassica é um local propício para o estudo do escoamento e infiltração da água, devido a sua fase atual de desenvolvimento, na qual ainda não foi totalmente urbanizado e existe a possibilidade de aplicar diferentes técnicas para auxiliar em medidas de contenção de inundações. É importante citar que o Comitê de Bacia do Rio Macaé incluiu, no Plano de Bacia, a necessidade de investir em estudos para o aumento do conhecimento e avaliar possíveis melhorias do sistema de drenagem existente. Tal aporte de conhecimento é aplicável nas ações de mitigação de alagamentos e inundações conforme demandado na revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico de Macaé, página 66 e 68 (SAAD; CAVALCANTE; MENDES, 2020).

A plataforma MOHID tem sido desenvolvida para aplicações oceânicas e hidrológicas desde 1985. Sendo possível fazer simulações hidrodinâmicas e de transporte no oceano pelo MOHID WATER e hidrológicas no continente pelo MOHID LAND. A plataforma é oferecida como um código de programação aberto e livre, sendo produzida na MARETEC no Instituto Superior da Universidade de Lisboa. Uma das interfaces da plataforma MOHID foi desenvolvida pela Bentley® sendo denominada OpenFlows FLOOD®. O sistema OpenFlows FLOOD® é um software comercial que consiste de uma interface que permite: (i) elaborar um modelo com facilidade usando os códigos da plataforma MOHID; (ii) rodar as simulações e; (iii) visualizar os resultados obtidos.

A plataforma MOHID tem diversos recursos computacionais para modelar a hidrodinâmica, a hidrologia, o transporte de substâncias, considerando os fenômenos de interesse dos pesquisadores, e com a possibilidade de adotar diferentes formulações conforme a aplicação. Mais especificamente, tratando do caso de interesse para este estudo, o MOHID LAND pode ser utilizado para simular o escoamento superficial e a infiltração da água no solo (JUNIOR; COSTA; RODRIGUES, 2016; SIMIONESEI et al., 2016; CAMPOS et al., 2017; PAIVA et al., 2017; GARNEAU; DUCHESNE; ST-HILAIRE, 2019; JUNIOR et al., 2019).

De acordo com Trancoso et al. (2009), o uso de softwares de simulação, como o MOHID LAND, permite uma integração entre diferentes processos hidrológicos, que irão gerar um prognóstico do sistema, podendo auxiliar na seleção da melhor técnica de drenagem urbana.

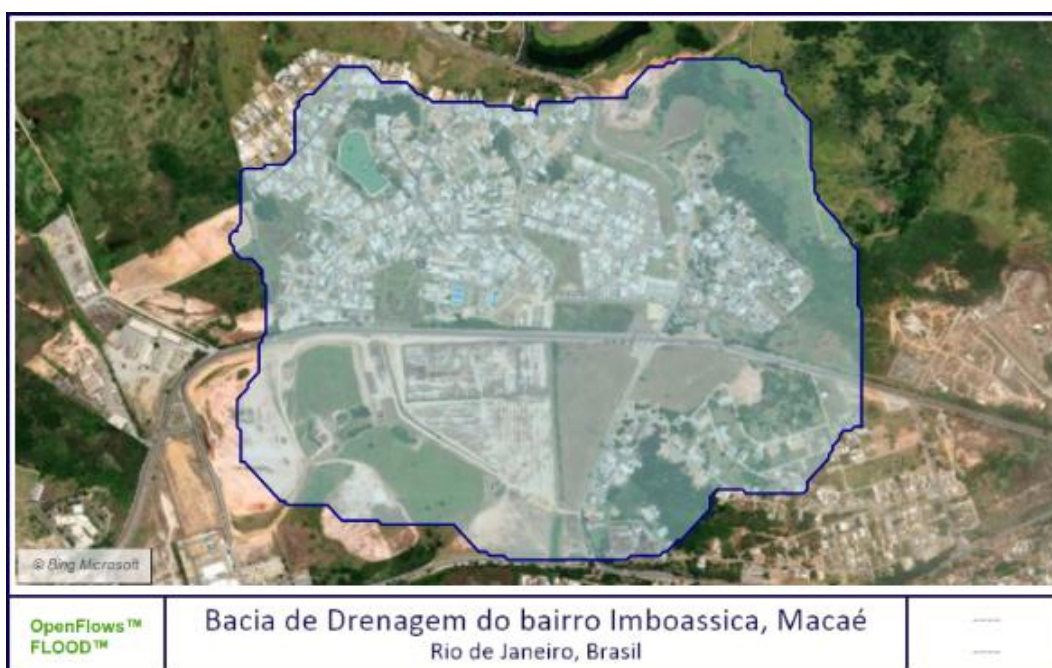
2. OBJETIVO

O objetivo geral desta pesquisa é estudar o sistema de drenagem urbana de um bairro residencial por meio de um estudo de caso no município de Macaé, Rio de Janeiro. Assim, foi realizada uma análise de sensibilidade da drenagem considerando o avanço do processo de urbanização no bairro Imboassica. Para isso, tem-se os objetivos específicos: Avaliar a resposta do modelo para diferentes condições de uso do solo, modificando no modelo os valores adotados para o Coeficiente de Manning e o *Curve Number*, avaliar a resposta do modelo para dois tipos de topografia e, dois períodos de retorno para a chuva de projeto (10 e 50 anos).

3. METODOLOGIA

Foi utilizada a plataforma MOHID contando com a interface do software OpenFlows FLOOD® para elaborar cenários com diferentes características de solo, e adotou-se duas topografias distintas. Na primeira avaliação foram feitas 3 simulações (1, 2 e 3) considerando a topografia natural do terreno utilizando-se dados de altimetria obtidas a partir do projeto TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A seguir, a cota de altitude representada no *Digital Elevation Model* (DEM) foi elevada em 10 metros nos locais correspondentes a localização das casas e 1 metro nas estradas do condomínio residencial e, então, foram refeitas as 3 simulações (4, 5, e 6). As seis simulações adotaram uma chuva de projeto de 10 anos de período de retorno. Por fim, mais seis simulações foram feitas tendo sido adotada uma chuva de 50 anos de período de retorno. A Bacia de Drenagem simulada na região estudo é ilustrada na Figura 1.

Figura 1: Bacia de Drenagem do bairro Imboassica, Macaé.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para estudar o transporte da água nos canais de drenagem formados no modelo de acordo com o solo da região, adotou-se diferentes valores de Coeficiente de Manning. O Coeficiente de Manning busca refletir a rugosidade do canal e sua interferência no fluxo de água (ZHANG et al., 2019). Os valores utilizados nesse estudo foram retirados de Gribbin (2014) nas páginas 390, 391 e 392. A tabela de valores para o Coeficiente de Manning é extensa e a Tabela 1 representa apenas os valores utilizados nesse estudo.

Tabela 1: Parte da Tabela com os valores para o coeficiente de rugosidade de Manning adotados neste trabalho

| Coeficientes de Rugosidade de Manning [$m^{(-1/3)}/s$] | |
|---|-------------|
| Bueiros Fechados ↳ A Cloreto de Polivinil (PVC) | 0,007-0,011 |
| Canais Naturais (Cursos de água) ↳ A Cursos de água menores ↳ Seção razoavelmente regular ↳ Um pouco de gramas e de ervas, pouco ou nenhum mato | 0,030-0,035 |
| Canais Naturais (Cursos de água) ↳ A Cursos de água menores ↳ Seção razoavelmente regular ↳ Crescimento denso de ervas, profundidade de escoamento significativamente maior que a altura das ervas | 0,030-0,050 |

Fonte: GRIBBIN (2014).

Com o objetivo de modelar o escoamento superficial das regiões de estudo de acordo com o solo, utilizou-se a formulação com o *Curve Number*. O *Curve Number* é um parâmetro usado para descrever o potencial das águas que escoam superficialmente, considerando as perdas que ocorrem em parte pelo volume de água que infiltra (percolando dentro do meio poroso do solo) e também em parte por evapo-transpiração, sendo perdida para a atmosfera por evaporação e transpiração das plantas. O *Curve Number* depende, portanto, das características do solo e da sua cobertura (FERNANDES; COSTA; STUDART, 2017).

O *Curve Number* trata principalmente da representação de diferentes condições hidrológicas, sendo ajustado em função de quatro tipos diferentes de solo e de diversos padrões de uso e ocupação. A quantificação desse parâmetro se faz através de uma série de valores pré-estabelecidos (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016).

Para entender os grupos de solo adotados, foram utilizados os valores estabelecidos no livro de Miguez, Veról e Rezende (2016) na página 55, conforme apresentado a seguir, na Tabela 2.

Tabela 2: Tabela com tipos de solo.

| Grupos hidrológicos de solos | |
|------------------------------|---|
| Grupo A | Solos arenosos, com baixo teor de argila total (inferior a 8%), sem rochas, sem camada argilosa e nem mesmo densificada até a profundidade de 1,5m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1% |
| Grupo B | Solos arenosos menos profundos que os do grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, o limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2% e 1,5 %. Não pode haver pedras nem camadas argilosas até 1,5m, mas é quase sempre presente uma camada mais densificada que a camada superficial |
| Grupo C | Solos barrentos, com teor de argila de 20% a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1,2m. No caso de terras roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5m. Nota-se, a cerca de 60cm de profundidade, camada mais densificada que no grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade |
| Grupo D | Solos argilosos (30% a 40% de argila total) e com camada densificada a aproximadamente 50 cm de profundidade ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados |

Fonte: MIGUEZ, VEROL e REZENDE (2016).

No valor utilizado para a área vegetada, considerada como Floresta ou Bosque, para o *Curve Number*, optou-se por 50 ao invés de 55 devido a presença de um solo arenoso com argila na região, mas com boa profundidade. Os valores utilizados nesse estudo foram retirados de Gribbin (2014), mais especificamente, nas páginas 448 e 449, sendo apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Parte da Tabela com valores utilizados para o *Curve Number* utilizados neste trabalho.

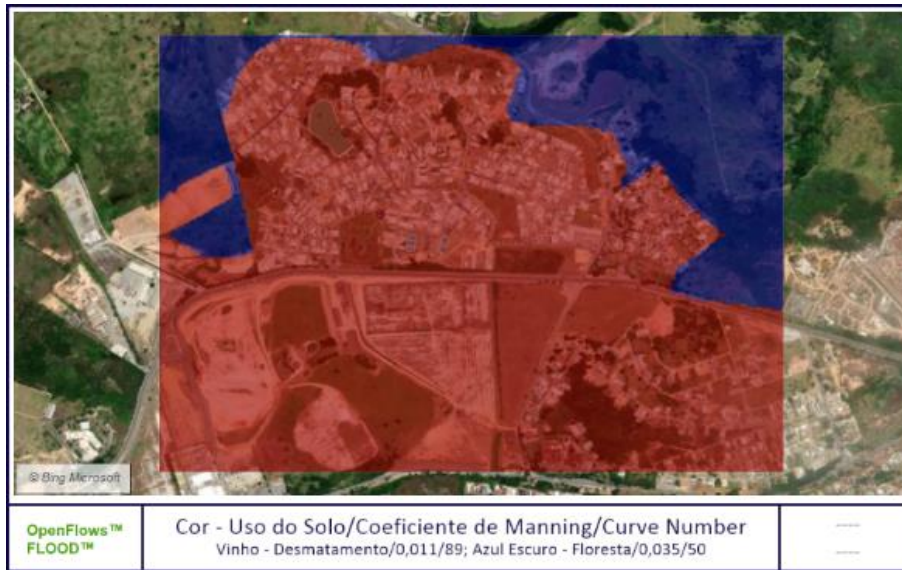
| Descrição da cobertura | Grupos | | | |
|--|--------|----|----|----|
| | A | B | C | D |
| Tipo de cobertura e condição hidrológica | | | | |
| Áreas impermeáveis: Pavimentadas; valas abertas | 83 | 89 | 92 | 93 |
| Bosque: Bosques protegidos de pastoreio, e matos cobrem adequadamente o solo | 30 | 55 | 70 | 77 |

Fonte: GRIBBIN (2014).

No presente artigo, foram adotadas três variações de Coeficiente de Manning e três variações de *Curve Number* para as simulações: Nas simulações 1 e 4 adotou-se que a região seria impermeável; nas simulações 3 e 6 adotou-se toda a região como sendo vegetada; nas simulações 2 e 5 adotou-se parte vegetada e parte urbanizada.

Para preparar os arquivos de entrada utilizados na simulação 2 e 5, foi produzido um mapa de uso do solo no software QGIS® e, o mesmo foi importado para o programa hidrológico OpenFlows FLOOD® adotando os seguintes valores de *Curve Number*: para vegetação de 50 e urbanização de 89, e os seguintes valores de Manning: para vegetação de 0,035 e urbanização de 0,011. Na Figura 2 está representado o mapa com valores na legenda de *Curve Number* e Manning adotados na simulação 2 e 5.

Figura 2: Mapa com a representação do *Curve Number* e Coeficiente de Manning adotados na simulação 2 e 5 para área urbanizada (desmatamento) em vinho e área vegetada (floresta) em azul.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em toda a bacia foi adotada a chuva de projeto da cidade de Macaé para um período de retorno de 10 anos e após, de 50 anos.

A definição da precipitação adotada no modelo foi estabelecida a partir da formulação de Intensidade, Duração e Frequência (IDF) de Chuvas Intensas (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016):

$$I = \frac{aT_r^n}{(t+b)^m}, \quad (1)$$

em que a , b , m , n são parâmetros que dependem do espaço geográfico onde a precipitação está sendo analisada;

t é o tempo de duração da chuva em minutos (min);

T_r é o tempo de Retorno (anos).

Neste trabalho foi adotada a equação de precipitação máxima, desenvolvida a partir da equação (1) para a cidade de Macaé (FESTI, 2007):

$$I_{max} = \frac{444,258 * T_r^{0,263}}{(t+6,266)^{0,655}}, \quad (2)$$

enquanto que $t = t_c$;

Em que I_{max} é a precipitação máxima (mm/h).

Para a estimativa do tempo de concentração, considerando o aspecto de simplicidade e boa aceitação na área de Engenharia Civil, foi adotada a formulação denominada *Califórnia Culverts Practice* (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016):

$$t_c = 57 * \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385}, \quad (3)$$

em que:

t_c é o tempo de concentração (min);

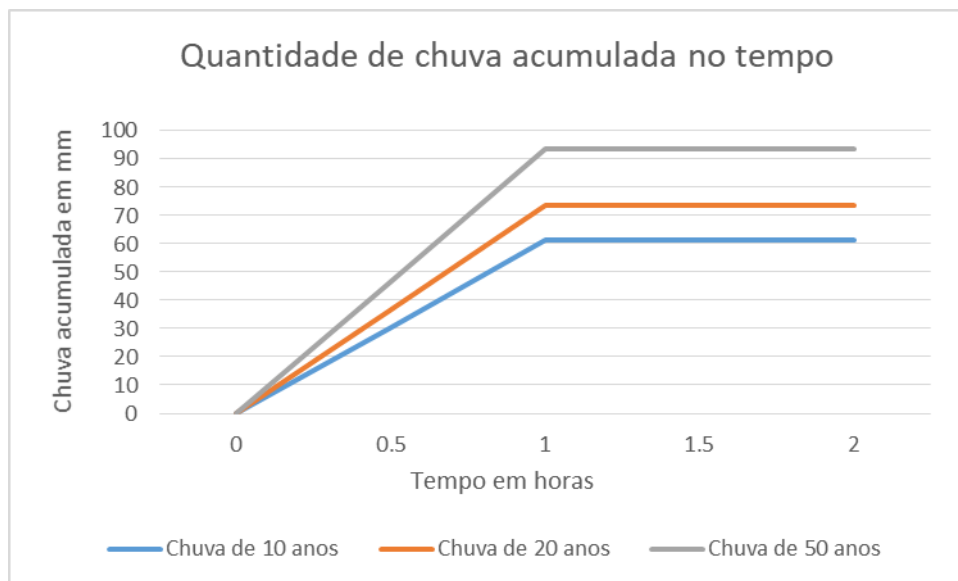
L é o comprimento do canal (km);

H é o desnível entre o ponto mais elevado da bacia e o exutório (m).

Foram adotados para cálculo o desnível de 1 metro e o comprimento do canal de 0,826344 km. Com o uso das equações (1) a (3), é possível estabelecer a evolução da intensidade da precipitação ao longo do tempo com uma série temporal e utilizar na simulação da drenagem urbana.

O tempo de concentração calculado para a bacia de drenagem foi de 45 minutos, no entanto, foi considerada uma chuva de 1h de duração. A simulação foi feita por 2 horas, logo após 1h de simulação com chuva, foi feita uma simulação de 1h sem chuva, isto porque, esperava-se visualizar a queda na curva da chuva na segunda hora de simulação. Como em eventos de chuva intensa, a precipitação costuma ser contínua, mas de intensidade diferente, foi considerada uma chuva de duração de 1h, 15 minutos a mais do tempo de concentração da bacia de drenagem, para compensar a segunda hora sem chuva. A simulação foi executada para um período de 2 horas, em um período do dia hipotético, no caso, esse horário foi de 12h as 14h. A quantidade de água acumulada durante as 2 horas de simulação para uma chuva de projeto de 10, 20 e 50 anos é ilustrada na Figura 3.

Figura 3: Quantidade de chuva acumulada no tempo.



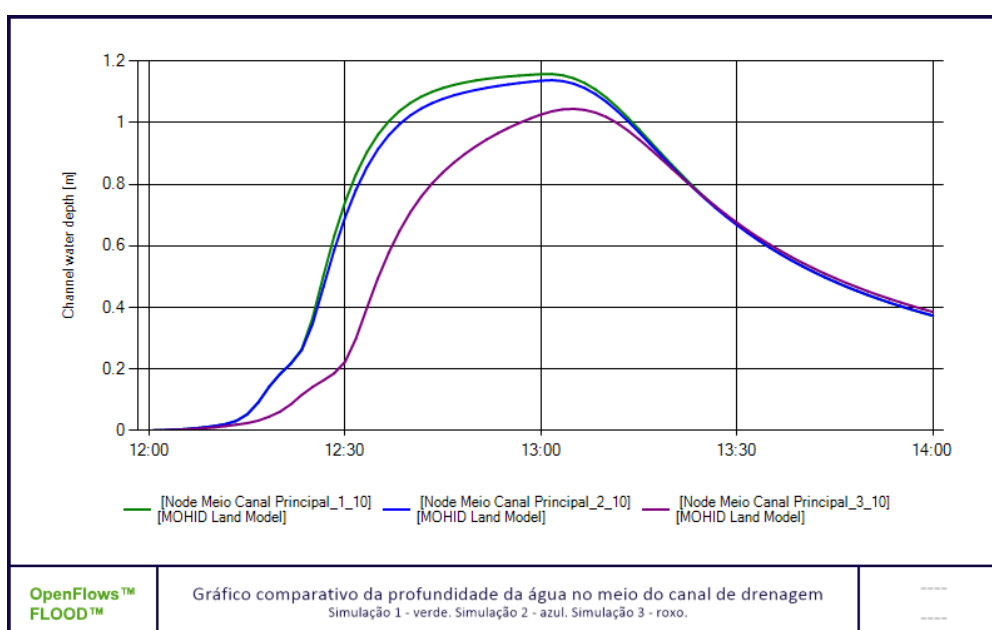
Fonte: Elaborado pelos autores.

4. RESULTADOS

Com os resultados das simulações, é possível comparar a lâmina d'água em pontos escolhidos como sendo de interesse dentro do canal de drenagem. Para estudo nesse trabalho, foram utilizados dois pontos, a saber: a região mediana do canal principal e a região final do canal principal, que foram considerados mais relevantes.

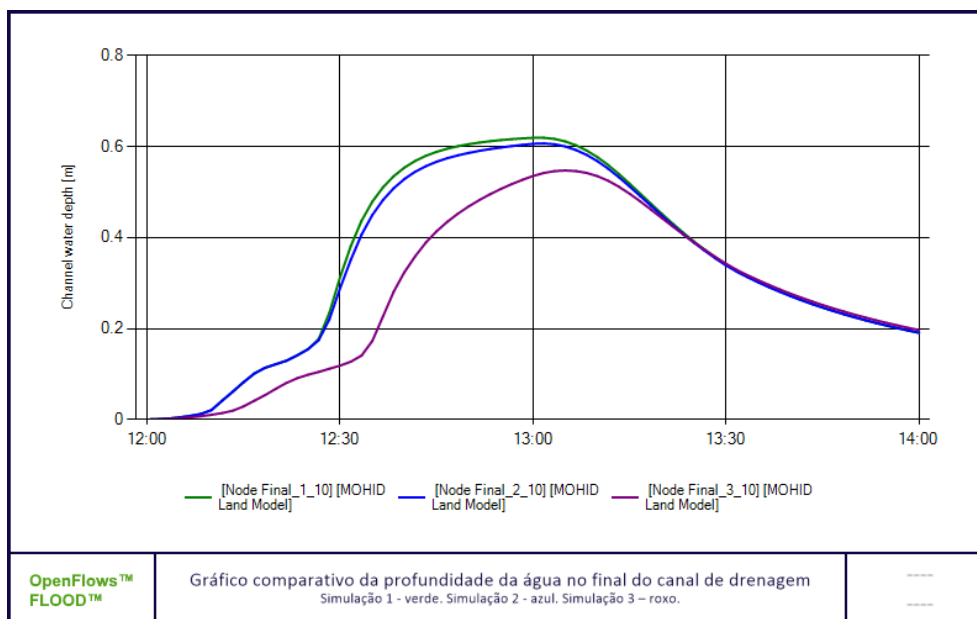
Nas Figuras 4 e 5 são ilustrados os gráficos comparativos da simulação 1 (verde), simulação 2 (azul), simulação 3 (roxo), para um ponto localizado em uma posição intermediária do canal e um outro no final do canal de drenagem, respectivamente, para uma chuva de período de retorno de 10 anos. A simulação 2 (azul) representa o solo dividido entre urbanizado e vegetado conforme Figura 2, enquanto que a simulação 1 (verde) tem-se o solo totalmente urbanizado.

Figura 4: Comparação das simulações 1, 2 e 3 para um período de retorno de 10 anos no meio aproximado do canal.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 5: Comparação das simulações 1, 2 e 3 para um período de retorno de 10 anos no fim aproximado do canal.



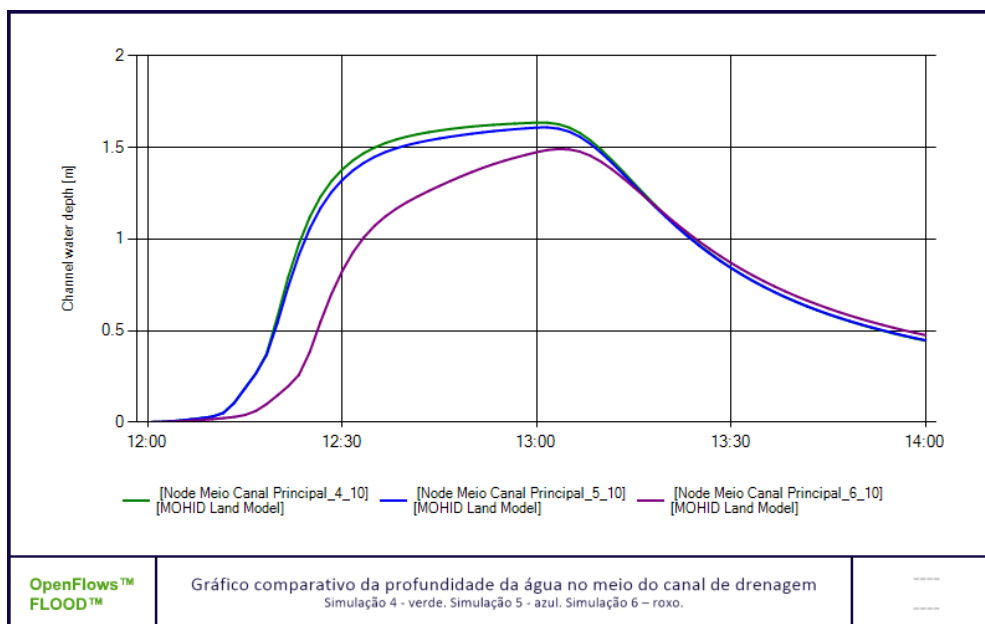
Fonte: Elaborado pelos autores.

Com base nas Figuras 4 e 5 pôde-se perceber que o canal de drenagem tinha uma lâmina de água mais acentuada conforme a área urbanizada se mostrava mais presente, a simulação 1 (verde) denota uma região impermeabilizada (correspondente ao *Curve Number* 89), enquanto que a simulação 3 (roxo) denotou uma região totalmente vegetada (correspondente ao *Curve Number* 50).

O modelo foi desenvolvido considerando primeiramente apenas os dados de altimetria do projeto TOPODATA do INPE que correspondem à topografia natural do terreno medida por satélite e, por isso, não consideram mudanças de altitude geradas pela urbanização. Por esse motivo, foi feita uma modificação na topografia do terreno, elevando 1 metro a cota das células que representam estradas e 10 metros a cota das células que representam residências, e foram realizadas três novas simulações.

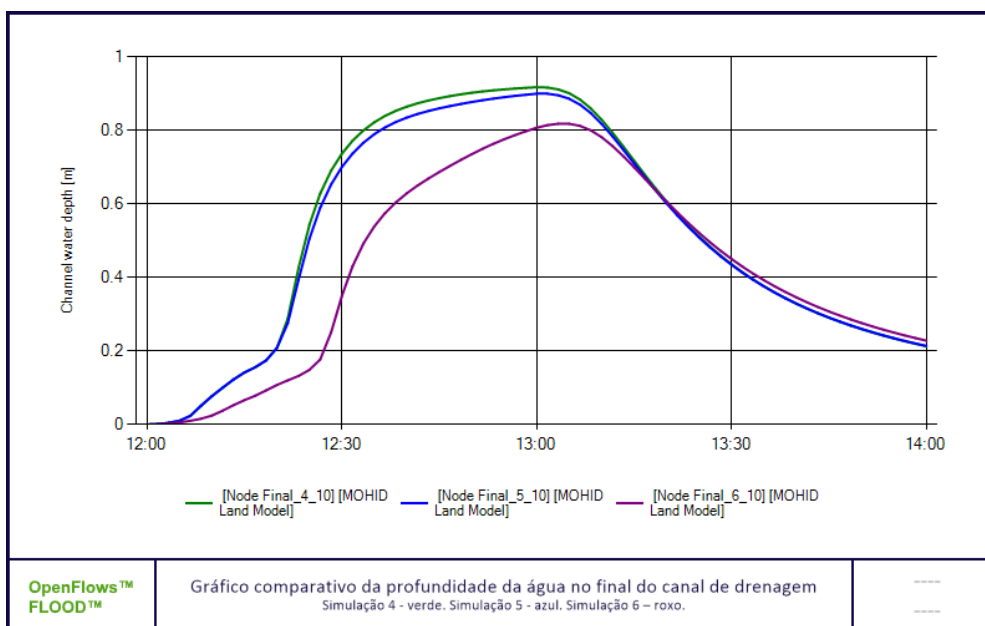
Com os resultados das simulações, foram comparados os resultados para a lâmina d'água nos mesmos pontos dentro do canal de drenagem. Nas Figuras 06 e 07 são ilustrados os gráficos comparativos das simulações 4 (verde), simulação 5 (azul), simulação 6 (roxo), para o ponto intermediário do canal e final do canal de drenagem, respectivamente, para uma chuva de período de retorno de 10 anos. A simulação 5 (azul) representa o solo dividido entre urbanizado e vegetado conforme Figura 2, enquanto que a simulação 4 (verde) tem-se o solo totalmente urbanizado.

Figura 6: Comparação das simulações 4, 5 e 6 para um período de retorno de 10 anos no meio aproximado do canal.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 7: Comparação das simulações 4, 5 e 6 para um período de retorno de 10 anos no fim aproximado do canal.



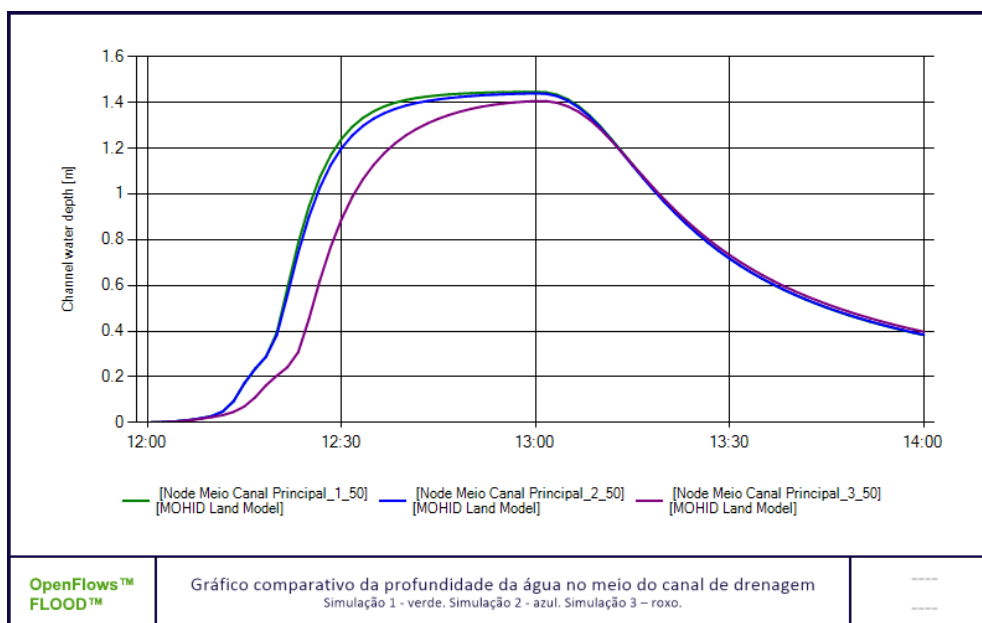
Fonte: Elaborado pelos autores.

Tomando como referência as Figuras 06 e 07 é possível perceber que o canal de drenagem tinha uma lâmina de água maior conforme a área se torna mais urbanizada, a simulação 1 (verde) denota uma região impermeabilizada (correspondente ao *Curve Number* 89), enquanto que a simulação 3 (roxo) denotou uma região totalmente vegetada (correspondente ao *Curve Number* 50).

Observe que, ao analisar comparativamente a Figura 04 com a Figura 06, e a Figura 05 com a Figura 07, percebe-se que a lâmina de água aumentou dentro do canal de drenagem. Isso pode ser explicado pelo maior acúmulo de água nas regiões adjacentes dos prédios e estradas que tiveram suas alturas consideradas, esse aumento da quantidade de água é deslocado ao canal devido a topografia e diminuição de região disponível para infiltração.

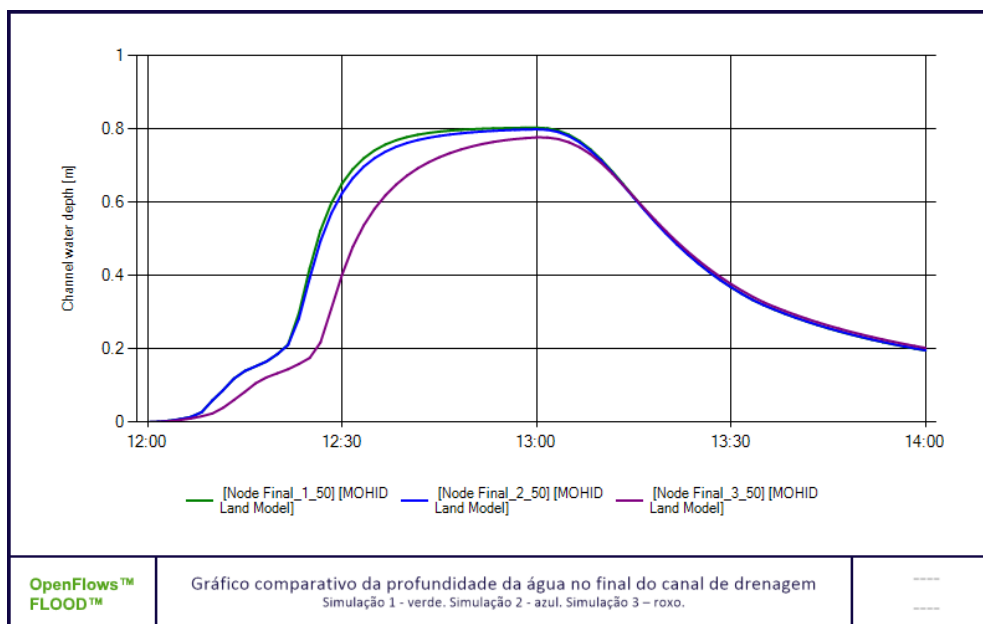
Nas Figuras 08 e 09 são ilustrados os gráficos comparativos da simulação 1 (verde), simulação 2 (azul), simulação 3 (roxo), para um ponto localizado em uma posição intermediária do canal e um outro no final do canal de drenagem, respectivamente, para uma chuva de período de retorno de 50 anos. A simulação 2 (azul) representa o solo dividido entre urbanizado e vegetado conforme Figura 2, enquanto que a simulação 1 (verde) tem-se o solo totalmente urbanizado.

Figura 8: Comparação das simulações 1, 2 e 3 para um período de retorno de 50 anos no meio aproximado do canal.



Fonte: Elaborado pelos autores.

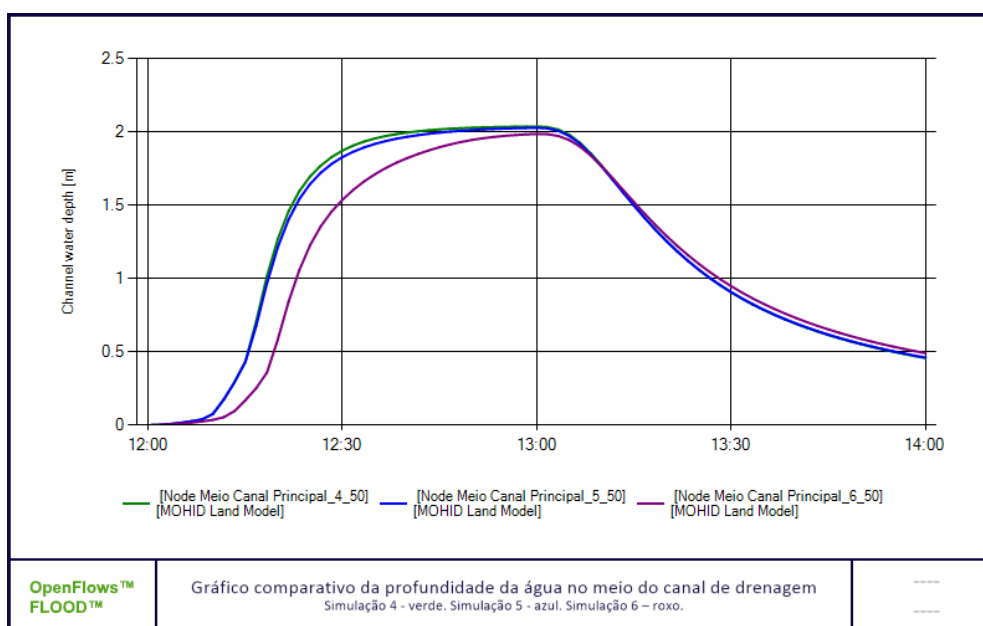
Figura 9: Comparação das simulações 1, 2 e 3 para um período de retorno de 50 anos no fim aproximado do canal.



Fonte: Elaborado pelos autores.

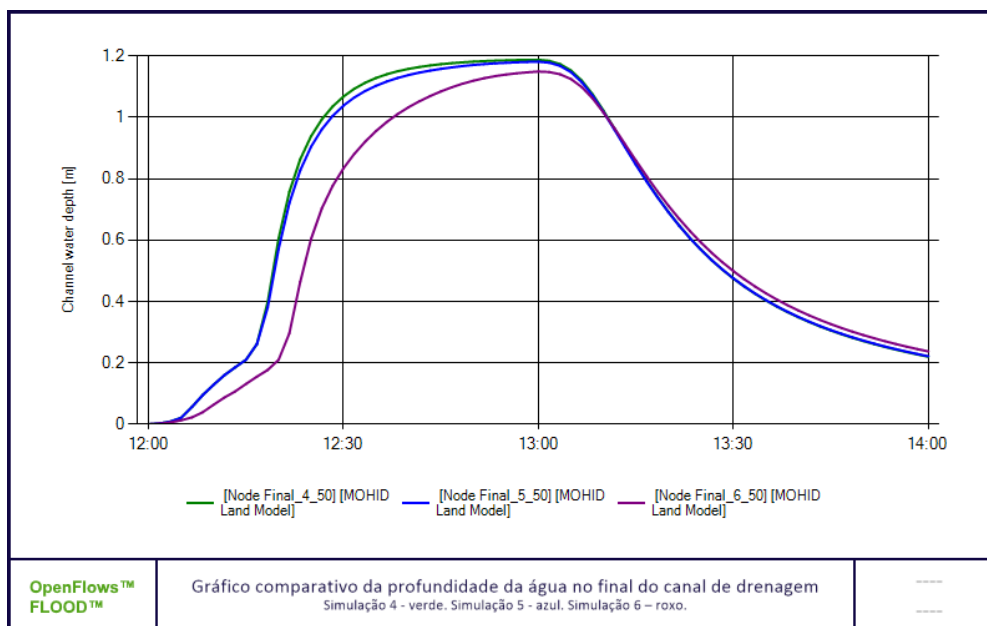
Nas Figuras 10 e 11 são ilustrados os gráficos comparativos da simulação 4 (verde), simulação 5 (azul), simulação 6 (roxo), para o ponto intermediário do canal e final do canal de drenagem, respectivamente, para uma chuva de período de retorno de 50 anos. A simulação 5 (azul) representa o solo dividido entre urbanizado e vegetado, conforme Figura 2, enquanto que a simulação 4 (verde) tem-se o solo totalmente urbanizado.

Figura 10: Comparação das simulações 4, 5 e 6 para um período de retorno de 50 anos no meio aproximado do canal



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 11: Comparação das simulações 4, 5 e 6 para um período de retorno de 50 anos no fim aproximado do canal.



Fonte: Elaborado pelos autores.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pela análise dos resultados, observou-se que nas simulações onde houve maior elevação nas localizações das casas e da estrada no condomínio, a lâmina d'água aumentou nos canais de drenagem, tal incremento foi atribuído a diminuição do espaço livre para a distribuição da água no modelo, e foi considerado mais realista. Em relação às simulações para um período de projeto de 10 e 50 anos, conclui-se que o aumento da quantidade de chuva gerou um aumento esperado na lâmina de água nos canais de drenagem.

Pôde-se observar que na segunda hora de simulação, a lâmina de água não havia descido totalmente, o que indica que o tempo que a água demora em percorrer o canal (tempo de concentração) é maior do que 45 minutos, isso mostra uma possível inadequação da formulação adotada para o tempo de concentração para esse estudo de caso. Uma hipótese para essa inadequação pode ser a falta de parâmetros que englobem os obstáculos que a água tem durante sua trajetória pelo canal, como é o caso do Coeficiente de Manning.

Pôde-se observar, também, uma influência muito perceptível da infiltração devido ao valor de *Curve Number* adotado, pois o pico de cheia tende a diminuir conforme mais regiões são consideradas vegetadas na simulação (do verde ao roxo). Além disso, pela mudança no Coeficiente de Manning, observa-se um atraso do escoamento superficial, ou seja, um aumento na demora para que a água chegue ao canal principal de drenagem, assim, as simulações 3 e 6 chegam a ter um atraso de alguns minutos para que seja observada uma considerável lâmina de água no canal.

As observações no estudo foram coerentes com as expectativas técnicas de agravamento de problemas de drenagem urbana causadas pelo processo de urbanização. Os problemas podem ser atenuados com a adoção de medidas compensatórias que retenham a parte do escoamento superficial. A localização de pontos com maior lâmina de água permite avaliar quais são os pontos mais atingidos e quais áreas poderiam ser candidatas para adoção de técnicas compensatórias. Para

simular as técnicas compensatórias indica-se adotar como referência o alagamento gerado pela simulação 1 pois este representaria o pior cenário, com a região mais impermeabilizada. E também, a simulação 2, que representa o comportamento mais parecido com a situação real, pois apresenta parte do bairro urbanizada e parte ainda com vegetação.

Como trabalho futuro, o modelo será ajustado para considerar a evolução da urbanização do bairro e a adoção de técnicas compensatórias, refletidas por meio da variação do Coeficiente de Manning e do *Curve Number*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte da FAPERJ, Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, do CNPq, Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e da CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Educação de Nível Superior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABD-ELHAMID, H. F. et al. Evaluating the Impact of Urban Growth on the Design of Storm Water Drainage Systems. **Water**, v. 12, n. 6, p. 1572, jun. 2020.

CAMPOS, L. F. DE et al. Disposal of Waste From Cementing Operation Offshore Oil and Gas Wells Building. **Ciência e Natura**, v. 39, n. 2, p. 413–422, 23 maio de 2017.

FERNANDES, R. DE O.; COSTA, C. T. F. DA; STUDART, T. M. DE C. Análise de sensibilidade em hidrogramas de cheias máximas obtidos pelo método do SCS em uma bacia urbana. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 3, p. 243–254, 7 jul. 2017.

FESTI, A. V. COLETÂNEA DAS EQUAÇÕES DE CHUVA DO BRASIL. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo. p. 10, 2007.

GARNEAU, C.; DUCHESNE, S.; ST-HILAIRE, A. Comparison of modelling approaches to estimate trapping efficiency of sedimentation basins on peatlands used for peat extraction. **Ecological Engineering**, v. 133, p. 60–68, ago. 2019.

GARZO, P. A.; DADON, J. R.; CASTRO, L. N. Modelling environmental vulnerability of the Biosphere Reserve Parque Atlántico Mar Chiquito, Argentina, under agricultural and urban impacts. **Ocean & Coastal Management**, v. 170, p. 72–79, mar. 2019.

GRIBBIN, J. **Introdução À Hidráulica, Hidrologia E Gestão De Ag.** [s.l.] Cengage Do Brasil, 2014.

JUNIOR, J. L. et al. Reservoir implantation for flood dampening in the Macaé River basin using the Mohid Land model. **Ciência e Natura**, v. 41, n. 0, p. 29, 4 out. 2019.

JUNIOR, J. L.; COSTA, V. T. R.; RODRIGUES, P. P. G. W. ASSESSMENT OF THE IMPACT OF A SMALL HYDROELECTRIC POWER PLANT OVER THE WATER QUALITY OF THE ITABAPOANA RIVER THROUGH A COMPUTATIONAL MODEL. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 1, p. 95–105, 31 jan. 2016.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. **Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. [s.l.] Elsevier, 2016.

PAIVA, P. M. et al. Comparing 3d and 2d computational modeling of an oil well blowout using MOHID platform - A case study in the Campos Basin. **Science of The Total Environment**, v. 595, p. 633–641, out. 2017.

SAAD, A. M.; CAVALCANTE, M. R. G.; MENDES, G. B. REVISÃO DO PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO DE MACAÉ (RJ). Produto 5 - Tomo III - Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas (Programas, Projetos e Ações necessárias para atingir os objetivos e as metas do PMSB / Definição das Ações para Emergências e Contingências). Versão Preliminar. Novembro - 2020. p. 74, 2020.

SIMIONESEI, L. et al. Numerical Simulation of Soil Water Dynamics Under Stationary Sprinkler Irrigation With Mohid-Land: Soil water dynamics with MOHID-Land. **Irrigation and Drainage**, v. 65, n. 1, p. 98–111, fev. 2016.

SURIPIN, S. et al. Reducing Stormwater Runoff from Parking Lot with Permeable Pavement. **E3S Web of Conferences**, v. 73, p. 05016, 1 jan. 2018.

TAVARES, L. P. DA S. et al. WATER MANAGEMENT AND URBAN FLOOD MITIGATION: STUDIES AND PROPOSALS FOR THE MACAÉ RIVER BASIN IN BRAZIL. **Journal of Urban and Environmental Engineering**. Disponível em: <<https://periodicos.ufpb.br/ojs2/index.php/juee/article/view/41313/22546>>. Acesso em: 27 out. 2019.

TRANCOSO, A. R. et al. An advanced modelling tool for simulating complex river systems. **Science of The Total Environment**, v. 407, n. 8, p. 3004–3016, abr. 2009.

ZHANG, H. et al. Determination of Emergent Vegetation Effects on Manning's Coefficient of Gradually Varied Flow. **IEEE Access**, v. 7, p. 146778–146790, 2019.