

AVALIAÇÃO DAS VAZÕES DE PICO PRÉ E PÓS-URBANIZAÇÃO COM ADOÇÃO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS NA BACIA DO CÓRREGO RESSACA (MG)

Amanda Soalheiro¹ & Talita Fernanda das Graças Silva¹

RESUMO – O crescimento urbano acelerado contribuiu para a impermeabilização do solo e para a alteração dos processos hidrológicos naturais, resultando no aumento das vazões de pico associadas a eventos de chuvas intensas. Nesse contexto, este trabalho avaliou os efeitos nas vazões de pico, decorrentes da implementação de células de biorretenção em áreas privadas na bacia do Córrego Ressaca, em Belo Horizonte (MG). As análises foram realizadas por meio de simulações hidrológicas no modelo *Storm Water Management Model* (SWMM), considerando cenários de pré-urbanização e pós-urbanização com adoção de técnicas compensatórias, dimensionadas conforme os critérios da Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. Os resultados indicaram que, das 47 sub-bacias avaliadas, 32 atenderam ao critério de controle de vazão para tempo de retorno de 2 anos, com reduções superiores a 50% em 10 sub-bacias. Para o tempo de retorno de 100 anos, embora os critérios normativos não tenham sido integralmente atendidos, observou-se redução das vazões de pico em todas as sub-bacias, com reduções máximas de até 45% e média aproximada de 24%. Os resultados evidenciam o potencial das células de biorretenção na mitigação de impactos hidrológicos da urbanização, inclusive em escala de bacia.

Palavras-Chave – Células de biorretenção, Vazões de Pico, SWMM.

ABSTRACT– Accelerated urban growth contributes to soil impermeabilization and to changes in natural hydrological processes, resulting in increased peak flows associated with intense rainfall events. In this context, this study evaluated the effects of implementing bioretention cells in private areas on peak flows in the Ressaca Stream watershed, located in Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil. The analyses were carried out through hydrological simulations using the Storm Water Management Model (SWMM), considering pre-urbanization and post-urbanization scenarios with the adoption of compensatory techniques designed according to the criteria established by the Technical Guidelines for the Preparation of Drainage Studies and Projects of the Belo Horizonte City Hall. The results indicated that, among the 47 evaluated sub-basins, 32 met the flow control criterion for a 2-year return period, with reductions greater than 50% observed in 10 sub-basins. For the 100-year return period, although the regulatory criteria were not fully achieved, reductions in peak flows were observed in all sub-basins, with maximum reductions of up to 45% and an average reduction of approximately 24%. The findings highlight the potential of bioretention cells to mitigate the hydrological impacts of urbanization, including at the watershed scale.

Key-words – Bioretention Cells, Peak Flows, SWMM.

¹) Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos; Telefone: (31) 3409-1870; Fax: (31) 3409-1001; E-mail: a.soalheiro@gmail.com; talita.silva@ehr.ufmg.br.

INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada, associada ao crescimento populacional e à expansão desordenada das cidades, tem intensificado a impermeabilização do solo (NEUPANE *et al.*, 2021). Nesse contexto, a ampliação do uso de infraestrutura cinza no desenvolvimento urbano, especialmente por meio de superfícies impermeáveis como concreto e asfalto, reduz a capacidade de infiltração da água no solo (JIA *et al.*, 2015; NGUYEN *et al.*, 2019). Como consequência, ocorrem alterações significativas na dinâmica hidrológica urbana, com aumento do escoamento superficial, comprometimento da capacidade dos sistemas de drenagem e impactos negativos sobre a qualidade da água e a sustentabilidade da drenagem urbana (ECKART *et al.*, 2017).

Em paralelo, o aumento da frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação agrava esse cenário, uma vez que volumes elevados de chuva, ao incidirem sobre superfícies impermeáveis, geram picos de escoamento que frequentemente excedem a capacidade da infraestrutura existente. Como resultado, tornam-se mais recorrentes os episódios de alagamentos e inundações, com impactos diretos sobre a infraestrutura urbana e a qualidade de vida da população (LIU *et al.*, 2023). Nesse contexto, as técnicas compensatórias de drenagem urbana, também denominadas dispositivos de desenvolvimento de baixo impacto (*Low Impact Development* – LID), têm se afirmado como uma abordagem estratégica para a gestão sustentável do escoamento pluvial.

As técnicas compensatórias aplicadas à drenagem urbana consistem em mecanismos e sistemas destinados à mitigação dos impactos associados aos eventos climáticos extremos e ao avanço da urbanização, atuando na coleta, armazenamento e tratamento das águas pluviais (ZHANG *et al.*, 2024). Essas técnicas fundamentam-se na busca por restabelecer, ainda que parcialmente, o comportamento hidrológico natural de bacias urbanizadas, por meio do aumento da infiltração, do armazenamento temporário do escoamento superficial, da atenuação das vazões de pico, do aumento do tempo de resposta hidrológica e da promoção da recarga aquífera (WRIGHT e HEANEY, 2001).

Por desempenharem papel fundamental no amortecimento das vazões de pico e na redução da velocidade do escoamento superficial, as técnicas compensatórias de drenagem vêm contribuindo para a diminuição dos impactos socioambientais relacionados às inundações urbanas e para a melhoria das condições ambientais e da qualidade de vida da população (ALENCAR *et al.*, 2022).

Dentre as soluções existentes, destacam-se as células de biorretenção, caracterizadas por estruturas de pequena escala compostas por camada drenante, substrato vegetal e cobertura superficial, projetadas para receber contribuições localizadas de escoamento superficial. Esses dispositivos promovem o armazenamento temporário, a infiltração, a evapotranspiração e a remoção

de poluentes por meio de mecanismos físicos, químicos e biológicos (ROY-POIRIER *et al.*, 2010; ROSSMAN, 2015; FENG *et al.*, 2016).

O presente estudo objetiva avaliar o impacto nas vazões em cenários de pré-urbanização, e pós-urbanização com emprego de técnicas compensatórias, especificamente células de biorretenção, em áreas particulares na bacia do Córrego Ressaca (Belo Horizonte, Minas Gerais). Para a metodologia, conforme apresentado por Soalheiro e Silva (2024), adotou-se para o dimensionamento destes dispositivos a Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem de Belo Horizonte; para a simulação hidrológica, o *Storm Water Management Model* (SWMM) e, para o geoprocessamento dos dados, o *software* QGIS.

METODOLOGIA

Área de Interesse

A Bacia do Córrego do Ressaca, localizada em Belo Horizonte (MG) e inserida na Bacia do Ribeirão do Onça, é um importante contribuinte da Lagoa da Pampulha, tanto em vazão quanto em carga de poluentes. O córrego possui cerca de 8,8 km de extensão, área de drenagem de 20,6 km² e nasce na cota 920 m, desaguando no encontro com o Córrego Sarandi (CPRM, 2001; SILVA *et al.*, 2014). Com elevado adensamento populacional, a bacia apresenta alta impermeabilização do solo e baixa cobertura vegetal, o que altera o regime hidrológico natural e favorece eventos recorrentes de inundação, assoreamento e degradação da qualidade da água (SOALHEIRO e SILVA, 2024).

Localização da Bacia do Córrego Ressaca (BH/MG)

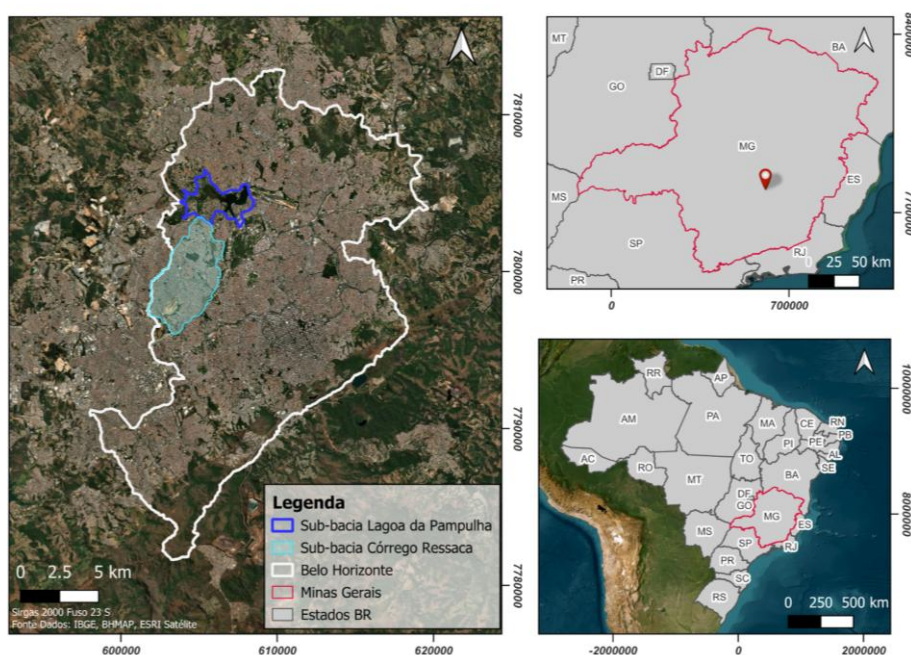


Figura 1 – Localização da Bacia do Córrego Ressaca (BH/MG)

Storm Water Management Model (SWMM)

O modelo hidrológico-hidráulico utilizado neste estudo foi o *Storm Water Management Model* – SWMM (ROSSMAN, 2015), um dos modelos mais utilizados em estudos de drenagem urbana atualmente e que foi empregado em diversos estudos científicos desenvolvidos em bacias hidrográficas brasileiras (SIQUEIRA *et al.*, 2019), e em estudos com o uso de LIDs (ARJENAKI *et al.*, 2020). O SWMM é um modelo determinístico de base física e semi-distribuído, concebido para reproduzir o comportamento de bacias hidrográficas urbanas, mas também podendo ser utilizado para simular a qualidade da água do escoamento superficial. Para a simulação deste estudo, adotou-se o modelo hidrológico-hidráulico desenvolvido, calibrado e validado por Silva *et al.* (2019), também apresentado por Soalheiro e Silva (2024), no qual a bacia do Córrego Ressaca foi discretizada em 50 sub-bacias, 86 condutos e 86 nós, com base em características topográficas, uso e ocupação do solo e na configuração do sistema de drenagem (BONNARY, 2011). As sub-bacias do modelo representam as unidades onde a precipitação incide e o escoamento superficial é gerado, sendo compostas por áreas permeáveis (com infiltração) e impermeáveis, e modeladas como reservatórios não lineares. O escoamento produzido é direcionado aos nós, que funcionam como pontos de entrada na rede de drenagem, composta por condutos. A precipitação efetiva foi estimada pelo método *Curve Number*, enquanto a propagação das cheias na rede foi simulada por meio da solução numérica das equações de Saint-Venant em 1D, adotando-se a abordagem da onda dinâmica. Adicionalmente, as LIDs foram incorporadas ao modelo no âmbito das sub-bacias

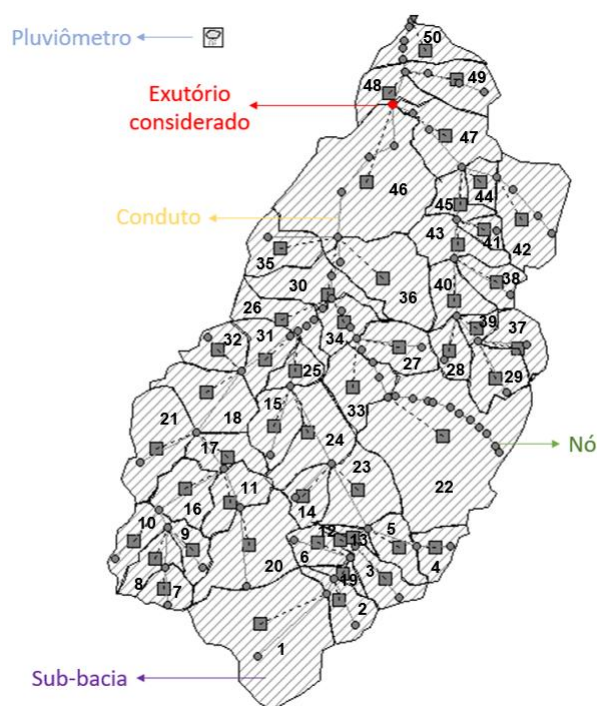


Figura 2 – Representação das sub-bacias no modelo SWMM

Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem Urbana para Belo Horizonte

O dimensionamento das células de biorretenção baseou-se na Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem Urbana do município de Belo Horizonte (PBH, 2022), a qual apresenta diretrizes para a gestão de águas urbanas, mitigação de riscos de inundação e projetos de dispositivos de controle na fonte.

Esta Instrução Técnica estabelece, para o dimensionamento das técnicas compensatórias, chuvas de projeto com tempos de retorno (TR) de 2 e 100 anos e duração de 120 minutos. O TR de 2 anos busca manter a vazão de pico próxima às condições de pré-urbanização em eventos frequentes, enquanto o TR de 100 anos visa amortecer ao menos 50% das vazões de pico associadas a eventos extremos (PBH, 2022). A instrução também recomenda o uso da Equação de Chuvas Intensas da Região Metropolitana de Belo Horizonte proposta por Pinheiro e Naghettini (1998), adotando curvas com 50% de probabilidade de ocorrência para a distribuição temporal da precipitação. Para o dimensionamento das células de biorretenção, é indicado que as áreas de contribuição às técnicas sejam em torno de 100 a 500 m², e os coeficientes de escoamento superficial e condutividades hidráulicas variem de 0,33 a 1,0 e de 10⁻⁵ a 5 x 10⁻⁷ m/s, respectivamente.

Células de Biorretenção

A quantidade de células de biorretenção em cada sub-bacia foi estimada por meio de *shapefiles* das áreas edificadas dos lotes disponibilizados pela prefeitura, representando as superfícies impermeáveis contribuintes ao escoamento superficial. Também foram considerados parâmetros físicos e ambientais, como profundidade do lençol freático, suscetibilidade a inundações, declividade do terreno e capacidade de infiltração do solo, visando identificar as áreas mais adequadas para implantação das técnicas compensatórias.

Devido à inviabilidade operacional do dimensionamento individual dos dispositivos, foram definidas classes de áreas de contribuição, utilizando-se o valor mediano de cada intervalo como referência para o dimensionamento das células de biorretenção representativas de cada classe. As áreas ocupadas pelos dispositivos, bem como a altura da camada de armazenamento superficial e os diâmetros dos dispositivos de saída controlada, bem como demais detalhes acerca da metodologia de dimensionamento adotada podem ser consultados em Soalheiro e Silva (2024). A Tabela 1 apresenta um resumo do dimensionamento das técnicas.

Tabela 1 - Resumo das áreas tratadas pelas células de biorretenção por sub-bacia no modelo conforme Soalheiro e Silva (2024).

Classe	Intervalo (m ²)	Área de contribuição (m ²) ¹	Nº Edificações	Técnica por Edificação	Área em planta (m ²)	h_b (cm)	D_b (mm)
1	0 - 50	25	17197	1	4,8	11,8	13,8
2	50 - 100	75	13959	1	14,3		21,8
3	100 - 150	125	10441	1	23,8		26,9
4	150 - 200	175	7696	1	33,3		31,0
5	200 - 300	235	6167	1	44,7		35,0
6	300 - 400	335	1416	1	63,7		40,6
7	400 - 500	440	381	1	83,6		45,4
8	500 - 1000	615 ²	588	2 ³	58,4		39,1
9	> 1000	1380 ²	176	3 ³	87,4		46,3

¹ A área de contribuição para cada classe refere-se à mediana (arredondada para valores inteiros).

² Por excederem a área máxima definida pela instrução, tais classes tiveram as áreas divididas conforme o nº de técnicas por edificação.

³ Considerando que os intervalos possuem áreas de contribuição maiores, adotou-se como premissa um nº maior de técnicas por edificação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando que o SWMM não permite espacializar as técnicas na bacia, optou-se por verificar, de forma mais geral, as vazões permissíveis e as vazões encontradas na simulação pós inserção das técnicas no âmbito de escala de sub-bacia. Neste sentido, utilizou-se, conforme indicação da instrução, para o coeficiente de pré-urbanização e intensidade da chuva, os seguintes valores: 0,25 e 57,55 mm/h, respectivamente. A Tabela 2 sintetiza as áreas adotadas para cada sub-bacia no modelo, bem como as vazões encontradas para cada uma delas considerando os critérios apresentados na *Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem Urbana para o município de Belo Horizonte*.

Tabela 2 – Avaliação das vazões de pico de TR 2 anos e duração de 120 minutos para cada sub-bacia

Sub-bacia	Área Total (ha)	Vazão pré-urbanização (m ³ /s)	Vazão pós-urbanização com LIDs (m ³ /s)	Critério atingido
1	147,1	5,88	4,03	Sim
2	22,5	0,90	0,38	Sim
3	27,3	1,09	1,39	Não
4	20,7	0,83	1,89	Não
5	26,2	1,05	0,49	Sim
6	21,7	0,87	0,97	Não

Sub-bacia	Área Total (ha)	Vazão pré- urbanização (m³/s)	Vazão pós- urbanização com LIDs (m³/s)	Critério atingido
7	17,0	0,68	0,33	Sim
8	24,8	0,99	1,12	Não
9	18,2	0,73	0,47	Sim
10	27,0	1,08	0,43	Sim
11	31,8	1,27	1,34	Não
12	6,9	0,28	0,48	Não
13	4,5	0,18	0,07	Sim
14	25,7	1,03	0,77	Sim
15	35,9	1,44	1,28	Sim
16	35,0	1,40	1,05	Sim
17	26,9	1,08	0,17	Sim
18	56,8	2,27	1,15	Sim
19	8,3	0,33	0,22	Sim
20	80,1	3,20	2,85	Sim
21	60,6	2,42	1,46	Sim
22	204,0	8,16	7,82	Sim
23	51,2	2,05	1,52	Sim
24	55,5	2,22	2,05	Sim
25	17,9	0,72	0,71	Sim
26	34,2	1,37	1,53	Não
27	30,6	1,22	1,59	Não
28	11,1	0,44	0,16	Sim
29	27,2	1,09	0,82	Sim
30	42,3	1,69	1,05	Sim
31	33,6	1,34	0,56	Sim
32	27,2	1,09	0,94	Sim
33	42,8	1,71	1,84	Não
34	26,4	1,06	0,39	Sim
35	37,6	1,50	1,22	Sim
36	72,8	2,91	2,99	Não
37	34,3	1,37	1,67	Não
38	24,7	0,99	1,37	Não
39	20,6	0,82	0,45	Sim
40	31,1	1,24	0,51	Sim
41	12,3	0,49	0,53	Não
42	73,6	2,94	3,36	Não

Sub-bacia	Área Total (ha)	Vazão pré-urbanização (m³/s)	Vazão pós-urbanização com LIDs (m³/s)	Critério atingido
43	36,1	1,44	1,22	Sim
44	15,5	0,62	0,55	Sim
45	19,8	0,79	0,53	Sim
46	173,1	6,92	5,71	Sim
47	55,6	2,22	2,34	Não

Observa-se que, dentre as 47 sub-bacias consideradas, 32 sub-bacias atenderam ao critério de TR 2 anos da supracitada Instrução, sendo que, para 10 sub-bacias, verificou-se que a vazão reduziu em mais de 50% pós-urbanização com as LIDs. Avalia-se positivamente o resultado obtido, à medida que, para as vazões de pós-urbanização encontradas com a adoção das técnicas, ou seja, as que foram obtidas pela simulação do modelo, as áreas de contribuição consideradas não foram as áreas impermeáveis totais de cada sub-bacia, uma vez que se considerou apenas as contribuições advindas das edificações da bacia. Portanto, mesmo a escala da instrução sendo micro (na fonte) e, consequentemente, do dimensionamento das técnicas implantadas, conseguiu-se obter um resultado satisfatório.

Em relação ao segundo indicador da Instrução, a respeito do TR de 100 anos, realizando a mesma análise anterior da taxa permissível de escoamento para condições de pré-urbanização, considerou-se, ao multiplicar o coeficiente de pré-urbanização (0,25) e intensidade da chuva (111,81 mm/h) um valor máximo de 28 mm/h. Para este novo cenário, verificou-se que, para todas as sub-bacias, o critério para TR 100 anos e duração de 120 minutos não foi atingido, independentemente do critério mais restritivo sendo a pré ou pós-urbanização. Tal resultado era esperado, uma vez que a simulação realizada com as técnicas não considera toda a área da sub-bacia como contribuição: para os cálculos, nem toda a parcela impermeável atuou como contribuinte no dimensionamento das técnicas. Contudo, verificou-se que, para todas as sub-bacias, quando se compara as condições pós-urbanização com e sem técnicas, há uma redução das vazões de pico, sendo que, a maior redução verificada foi de 45% para a sub-bacia 39 e, a média atingida foi de 24% aproximadamente, o que indica resultados satisfatórios de performance das técnicas (escala de bacia).

Em seu estudo com microrreservatórios na sub-bacia Luxemburgo, Dias (2022) apresenta que, para o dimensionamento conforme Instrução (PBH, 2022), a segunda câmara do microrreservatório, para evento de TR 100 anos e duração de 120 minutos em condições de pós-urbanização, não apresentou conformidade com este segundo indicador da instrução, tendo encontrado vazões maiores

para estas condições. Demonstrando, portanto, a dificuldade associada a viabilizar tal critério em condições mais reais.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, S. et al. (2022). “*Técnicas compensatórias de drenagem urbana para manejo de águas pluviais: revisão sistemática e análise comparativa de métodos convencionais e inovadores no estado do Mato Grosso*” in Anais do XIV Encontro Nacional de Águas Urbanas e IV Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos, Brasília – DF, Set. 2022.
- ARJENAKI, M. O.; SANAYEI, H. R. Z.; HEIDARZADEH, H. (2020). “*Urban Surface Runoff Simulation and Prioritization of Critical Sub Catchments Using SWMM Model and TOPSIS Method (Case Study: Shahrekord City)*”. Journal of Water and Wastewater, v. 31, n. 4, p. 99-113.
- BONNARY, M. (2011). “*Modélisation d’un bassin hydrologique: application au bassin de Pampulha (Belo Horizonte, Brésil)*”. Internship report. Ecole des Ponts ParisTech: Paris, France, 86p
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. (2001). “*Projeto Pampulha: estudo hidrogeológico da Bacia da Pampulha*”. BEATO, D. A. C.; DUTRA, G. M.; MEDEIROS, M. J. – Belo Horizonte: CPRM/PBH/P. Contagem.
- ECKART, K.; MCPHEE, Z.; BOLISSETTI, T. (2017) “*Performance and Implementation of Low Impact Development – A Review*”. Science of the Total Environment, v. 607, p. 413-432.
- FENG, Y.; BURIAN, S.; POMEROY, C. (2016). “*Potential of green infrastructure to restore predevelopment water budget of a semi-arid urban catchment*”. Journal of Hydrology, v. 542, p. 744–755.
- JIA, H.; YAO, H.; TANG, Y.; YU, S.L.; FIELD, R.; TAFURI, A.N. “*LID-BMPs planning for urban runoff control and the case study in China*”. Journal of Environmental Management, v. 149, p. 65-76, 2015.
- LIU, J.; STRONG, C.; WANG, J.; BURIAN, S. J. “*An Event-Based Resilience Index to Assess the Impacts of Land Imperviousness and Climate Changes on Flooding Risks in Urban Drainage Systems*”. Water, v. 15, n. 14, p. 2663, 2023.
- NEUPANE, B.; VU, T. M.; MISHRA, A. K. “*Evaluation of land-use, climate change, and low-impact development practices on urban flooding*”. Hydrological Sciences Journal, v. 66, n. 12, p. 1729–1742, 2021.
- NGUYEN, T.T.; NGO, H.H.; GUO, W.; WANG, X.C.; REN, N.; LI, G.; DING, J.; LIANG, H. “*Implementation of a specific urban water management - Sponge City*”. Science of the Total Environment, v. 652, p. 147-162, 2019.

PINHEIRO, Márcia Maria Guimarães; NAGHETTINI, Mauro. (1998). “*Análise regional de frequência de distribuição temporal das tempestades na Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 3, n. 4, p. 73-88.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE (PBH). Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem Urbana do Município de Belo Horizonte. Capítulo 3 - Controle na Fonte e Lançamento no Sistema Público de Drenagem. 104 f. Belo Horizonte, 2022. Disponível em: https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/obras-e-infraestrutura/Cap%C3%ADtulo3_ControlenaFonte.pdf. Acesso em: 19 de maio de 2024.

ROSSMAN, L. A. (2015). “*Storm Water Management Model: User's Manual*”. Version 5.1. Cincinnati, OH: U. S. Environmental Protection Agency.

ROY-POIRIER, A.; CHAMPAGNE, P.; FILION, Y. (2010). “*Review of Bioretention System Research and Design: past, present and future*”. Journal of Environmental Engineering, v. 136, n. 9, p. 878- 889.

SILVA, T. F. G., et al. (2014). “*Modelagem e monitoramento do escoamento superficial urbano nas bacias dos córregos Ressaca e Sarandi (Minas Gerais, Brasil)*” in Anais do X Encontro Nacional de Águas Urbanas, São Paulo, Set., 2014, 4p.

SILVA, T. F. G., et al. (2019). “*Impact of Urban Stormwater Runoff on Cyanobacteria Dynamics in A Tropical Urban Lake*”. Water, 11(5), 946.

SIQUEIRA, R. C.; MOURA, P. M.; SILVA, T. F. G. (2019). “*Methodology for the construction of an urban flood hazard chart*” in Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 24, 2019.

SOALHEIRO, A.; SILVA, T. F. G. (2024). “*Avaliação da eficiência de células de biorretenção em áreas privadas: estudo de caso da bacia do córrego Ressaca (MG)*” in Anais do XV Encontro Nacional de Águas Urbanas e V Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos, Recife, Set. 2024.

WRIGHT, L. T e HEANEY, J. P. (2001). “*Design of Distributed Stormwater Control and Reuse Systems*”. Storm Collection Systems Design Handbook. McGrawHill, EUA, 1008p.

ZHANG, Y.; LI, Q.; CHEN, X.; WANG, H. “*Performance evaluation of low impact development practices for urban stormwater management under climate change scenarios*”. Journal of Environmental Management, v. 358, p. 120926, 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Talita pela orientação do TCC que contribuiu para o presente trabalho, bem como à UFMG, pela estrutura e suporte acadêmico proporcionados. Por fim, registro meu agradecimento à GWS ENGENHARIA pelo incentivo e apoio à participação no simpósio.