

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ESTUDOS DE SIMULAÇÃO DE TELHADOS VERDES PARA CONTROLE DOS ESCOAMENTOS PLUVIAIS URBANOS NO BRASIL COM USO DO MODELO HIDROLÓGICO SWMM

Dayana Martins Nunes¹ ; Marcelo Obraczka² & Alfredo Akira Ohnuma Júnior³

Resumo – A quebra de paradigma da gestão convencional de drenagem urbana toma como base o modelo de desenvolvimento de baixo impacto (*Low Impact Development - LID*), que propõe a adoção de medidas de controle da qualidade e volumes dos escoamentos superficiais, buscando reproduzir as funções hidrológicas naturais da bacia. As modelagens computacionais se constituem como importantes ferramentas para definição de cenários prospectivos, visando à avaliação da viabilidade de implantação e desempenho de medidas de controle dos escoamentos pluviais urbanos. O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise de estudos sobre telhados verdes para controle dos escoamentos superficiais em bacias urbanas brasileiras, com uso do modelo hidrológico SWMM. Também foram identificados os parâmetros de caracterização dos telhados verdes e os resultados de redução das vazões de pico. Foram selecionados 10 estudos, desenvolvidos em bacias urbanas localizadas em diferentes estados brasileiros. De acordo com os estudos analisados, pode-se constatar que a eficiência dos telhados verdes para controle dos escoamentos foi maior para chuvas com baixos tempos de recorrência (2 a 15 anos), sendo observadas taxas de redução das vazões de pico de 11,10% a 88,00%. Recomenda-se que os valores dos parâmetros dos telhados verdes, compilados e consolidados neste trabalho, possam servir de referência para pesquisas futuras.

Palavras-Chave – Telhados verdes, bacias hidrográficas brasileiras, SWMM.

Abstract – The paradigm shift in conventional urban drainage management is based on the low impact development (LID) model, which proposes the adoption of quality control measures and volumes of surface runoff, seeking to reproduce the natural hydrological functions of the basin. Computational modeling is an important tool for the definition of prospective scenarios, aiming to assess the feasibility of implementing and performing measures to control urban rainfall runoff. The objective of this work was to carry out an analysis of studies on green roofs to control surface runoff in Brazilian urban basins, using the SWMM hydrological model. The characterization parameters of the green roofs and the peak flow reduction results were also identified. Ten studies were selected, developed in urban basins located in different Brazilian states. According to the analyzed studies, it can be seen that the efficiency of green roofs to control runoff was greater for rainfall with low recurrence times (2 to 15 years), being observed reduction rates of peak flow rates from 11.10% to 88.00%. It is recommended that the values of the parameters of green roofs, compiled and consolidated in this work, can serve as a reference for future research.

Keywords – Green roofs, brazilian hydrographic basins, SWMM.

1) Doutoranda em Engenharia Ambiental pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro – DEAMB/UERJ. E-mail: dayana.mnunes@gmail.com.

2) Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. E-mail: obraczka.uerj@gmail.com.

3) Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. E-mail: akira@eng.uerj.br.

INTRODUÇÃO

Sobretudo nas grandes metrópoles brasileiras, o processo de urbanização ocorreu de forma descontrolada e não planejada, resultando em diversos adensamentos urbanos que, historicamente, apresentam graves problemas nas esferas social, econômica e ambiental (BATTAUS; OLIVEIRA, 2016). Uma das principais transformações do meio físico, decorrente da urbanização, refere-se ao aumento do grau de impermeabilização dos solos, com efeitos diretos na dinâmica hídrica dos espaços urbanos. Segundo Medeiros *et al.* (2020), o agravamento das inundações, e a ampliação de suas frequências, é considerado como um dos principais impactos gerados pela urbanização.

Christofidis *et al.* (2020) avaliam as três fases da gestão da drenagem urbana. Na primeira fase, intitulada por drenagem urbana tradicional, o propósito era afastar imediatamente as águas pluviais em excesso, já que estas eram consideradas como prejudiciais, através da execução de obras de retificação e canalização dos cursos d'água. A segunda fase, denominada por drenagem urbana sustentável, foi marcada pela adoção de técnicas compensatórias aos efeitos da urbanização, que favorecem, sobretudo, o aumento da infiltração e armazenamento das águas. Por fim, a terceira fase de gestão apresenta propostas de Soluções baseadas na Natureza (SbN), que visam restaurar os processos naturais e compatibilizar as soluções “cinzas” (construídas pelo homem) e as soluções “verdes” (fornecidas pela natureza).

No Brasil, a quebra de paradigma da gestão da drenagem urbana se baseou no modelo de desenvolvimento de baixo impacto (*Low Impact Development - LID*), concebido inicialmente nos Estados Unidos e Canadá, que enfatiza a adoção de medidas de controle da qualidade e volumes dos escoamentos superficiais. Tais ações visam à implantação de técnicas que buscam reproduzir as funções hidrológicas naturais da bacia hidrográfica, no período pré-urbanização, como: telhados verdes, pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração e reservatórios de amortecimento nos lotes, como medidas de controle do escoamento superficial na origem/fonte.

Para avaliar o desempenho e a viabilidade de técnicas LID para controle dos escoamentos, podem ser empregadas metodologias que envolvam análises experimentais e simulações computacionais. Desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) em meados de 1971 (ROSSMAN, 2015), o modelo hidrológico *Storm Water Management Model* (SWMM) tem sido utilizado em vários países, inclusive no Brasil, para simular cenários prospectivos de implantação de tipologias de medidas de controle dos escoamentos em bacias urbanas.

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação de estudos sobre telhados verdes, quanto à eficiência na retenção e no controle de volumes de escoamentos superficiais em bacias urbanas brasileiras. Além da identificação de parâmetros de caracterização de telhados verdes, são apresentados resultados de redução das vazões de pico, a partir das simulações a partir da aplicação do modelo SWMM.

TELHADOS VERDES E O MODELO SWMM

Também referenciados como telhados vivos, coberturas verdes e ecotelhados, os telhados verdes consistem em um sistema construtivo que envolve a implantação de vegetação em lajes ou sobre telhados convencionais. Gonçalves (2018) apresenta uma descrição das várias camadas constituintes dos telhados verdes e suas respectivas funções:

- **Vegetação:** possui maior potencial de retenção de água no substrato, ainda com funções de evapotranspiração e interceptação;
- **Substrato:** fornece água e nutrientes para a vegetação, e no momento de chuva pode armazenar a água;

- Camada de filtro: previne que as partículas sejam transportadas para a drenagem;
- Camada de drenagem: evita encharcamentos e estresse da cultura;
- Camada de impermeabilização: evita que a água entre em contato direto com a estrutura do telhado.

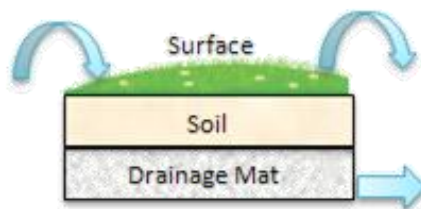
Os telhados verdes configuram-se como uma técnica LID que fornece múltiplos benefícios aos meios ambiente e social, como melhoria da eficiência energética e, da qualidade do ar, ganhos paisagísticos, redução das ilhas de calor, da temperatura e de ruídos externos, formação de novos habitats, aumento da vida útil do telhado, controle de águas pluviais e aproveitamento do recurso hídrico quando associados a reservatórios de armazenamento (BALDESSAR; TAVARES, 2012; OHNUMA JUNIOR *et al.*, 2017).

Segundo Canabrava Neto *et al.* (2021), os telhados verdes contribuem para a gestão sustentável da drenagem urbana, auxiliando na captação das águas pluviais, podendo melhorar a qualidade da água e diminuir a sobrecarga do escoamento.

As modelagens computacionais se constituem em importantes ferramentas para avaliação do impacto e desempenho de diferentes tecnologias, incluindo a de telhados verdes em uma bacia hidrográfica. São capazes de prever o impacto da implantação de técnicas LID sob diversos cenários de uso e ocupação do solo e diferentes eventos de chuva, otimizando o dimensionamento e localização das estruturas de controle do escoamento superficial (NUNES, 2017). O modelo hidrológico SWMM permite a avaliação de oito tipos diferentes de dispositivos de controle, como: células de biorretenção, jardins de chuva, telhados verdes, trincheiras de infiltração, pavimento permeável, barris de chuva (ou cisternas), calhas e células vegetativas (ROSSMAN, 2015).

No SWMM, a estrutura do telhado verde é definida por três camadas: superfície (*surface*), solo (*soil*) e drenagem (*drainage mat*), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1- Estrutura do telhado verde no modelo SWMM.



Fonte: A partir de uma das janelas do SWMM (2020).

Cada camada é caracterizada por um conjunto de parâmetros específicos (ROSSMAN, 2015). Na camada superfície (*surface*), os parâmetros são: profundidade de armazenamento (mm), que representa a altura máxima de armazenamento de água antes que ocorra o transbordamento; fração do volume de vegetação, que corresponde ao volume ocupado pelas folhas e caules; coeficiente de rugosidade de Manning, que depende do tipo de superfície; e declividade do telhado (%).

Os parâmetros que definem a camada de solo (*soil*) são: espessura (mm); porosidade (fração), volume de poros em relação ao volume total de solo; capacidade de campo (fração), volume de água nos poros em relação ao volume total depois que o solo foi completamente drenado; ponto de murcha (fração), volume de água nos poros, em relação a um volume total para um solo relativamente seco; condutividade hidráulica saturada (mm/h); gradiente da curva de condutividade hidráulica, inclinação da curva de *log* (condutividade) *versus* teor de umidade do solo (adimensional); sucção capilar (mm), valor médio do potencial matricial do solo na frente de umedecimento.

Por fim, os parâmetros da camada de drenagem (*drainage mat*) são: espessura (mm); fração de vazios, volume de espaço vazio em relação ao volume de sólidos na camada; coeficiente de rugosidade de Manning.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliação do desempenho de telhados verdes no Brasil, a metodologia utilizada para identificação e definição dos estudos realizados com uso do modelo SWMM consistiu em pesquisas nas plataformas de pesquisa acadêmica: *google* acadêmico, portal de periódicos da CAPES (incluindo o banco de teses e dissertações) e SciELO. As principais palavras-chave utilizadas na etapa de levantamentos dos estudos foram: “telhados verdes”, “controles dos escoamentos”, “LID” e “SWMM”. A pesquisa contemplou estudos publicados de 2013 até a presente data, e realizados em bacias urbanas brasileiras.

A seleção dos estudos apresentados neste trabalho tomou como base o detalhamento dos parâmetros de telhados verdes necessários para a modelagem no SWMM, bem como os resultados relacionados à redução das vazões de pico, mediante a simulação de chuvas reais e/ou de projeto.

Dos estudos selecionados, procedeu-se com a compilação dos parâmetros de caracterização dos telhados verdes, tabelados e, posteriormente, a apresentação de cenários e resultados obtidos para cada cenário, em cada estudo.

RESULTADOS

Com base nos critérios de pesquisa definidos neste trabalho, foram selecionados 10 estudos científicos, entre trabalhos de conclusão de curso, dissertações, teses e artigos científicos, desenvolvidos por Tominaga (2013), Leite *et al.* (2016), Martins (2017), Nunes *et al.* (2017), Rosa (2017), Galvane (2018), Gonçalves (2018), Breckenfeld (2019), Silva (2019) e Silva *et al.* (2019).

A definição dos parâmetros de cada camada do telhado verde teve como referência os trabalhos experimentais e de modelagem, além de valores de referência disponibilizados em guias e manuais de drenagem urbana, incluindo o manual do SWMM. A Tabela 1 apresenta os parâmetros dos telhados verdes adotados em cada estudo selecionado, bem como os parâmetros de referência disponibilizados no manual do SWMM (ROSSMAN, 2015). No final da Tabela 1 são apresentados os maiores percentuais de redução das vazões de pico obtidos nos estudos, considerando cenários com implantação individual de telhados verdes nas bacias, com exceção dos trabalhos de Rosa (2017), Galvane (2018) e Silva *et al.* (2019), que adotaram cenários com simulação conjunta de técnicas LID, obtendo maiores percentuais de redução.

Tabela 1 – Parâmetros dos telhados verdes adotados nos estudos selecionados com aplicação do modelo SWMM em bacias urbanas brasileiras.

PARÂMETROS		REFERÊNCIAS ADOTADAS										MANUAL SWMM
		Tominaga (2013)	Leite <i>et al.</i> (2016)	Martins (2017)	Nunes <i>et al.</i> (2017)	Rosa (2017)	Galvane (2018)	Gonçalves (2018)	Breckenfeld (2019)	Silva (2019)	Silva <i>et al.</i> (2019)	Rossmann (2015)
SUPERFÍCIE	Profundidade de armazenamento (mm)	3,80	-	0,00	75	100	-	5,08	100	75	3,00	-
	Fração do volume de vegetação	0,90	-	0,90	0,10	0,20	0,50	0,10	0,10	0,20	0,10	0,10 - 0,20
	Coefficiente de rugosidade de Manning	0,00	0,24	0,10	0,24	0,40	0,15	0,15	0,30	0,15	0,10	0,011 - 0,800
	Declividade do telhado (%)	0,00	5	20	6,00	10	-	7,50	23	1,00	1,00	-
SOLO	Espessura (mm)	120	150	150	150	100	100	100, 150 e 200	50, 100 e 150	75	150	75 - 100
	Porosidade (fração)	0,437	0,501	0,437	0,450	0,460	0,500	0,680	0,450	0,453	0,500	-
	Capacidade de campo (fração)	0,062	0,284	0,105	0,190	0,244	0,200	0,437	0,190	0,190	0,300	-
	Ponto de murcha (fração)	0,024	0,135	0,047	0,085	0,136	0,100	0,260	0,085	0,085	0,100	-
	Condutividade hidráulica (mm/h)	120,4	6,60	3,00	11	1,5	12,7	114	11	10,92	600	-
	Gradiente da curva de condutividade hidráulica	5	5,476	10	10	10	10	5,94	10	30	-	30 - 60
	Sucção capilar (mm)	49	169,92	2,40	110	218,5	88,9	290,07	110	110	75	-
DRENAGEM	Espessura (mm)	38	50	3	25	50	10	30	25	25,4	50	25,4 - 50,8
	Fração de vazios	0,25	-	0,50	0,60	0,50	0,75	0,60	0,40	0,50	-	0,50 - 0,60
	Coefficiente de rugosidade de Manning	0,50	-	0,10	0,40	0,40	0,03	0,05	0,02	0,10	0,1	0,10 - 0,40
Redução do Pico de Vazão		43,32%	18,00%	16,37%	11,10%	73,80%	88,00%	79,90%	43,61%	45,70%	76,49%	-

Fonte: Os Autores, 2021.

Tominaga (2013) avaliou o efeito da implantação de medidas de controle na fonte para redução das vazões de pico na bacia do Córrego da Luz (afluente do rio Tietê), com área de 1,6 km², caracterizada por uma ocupação urbana intensa e consolidada. Para fins de modelagem no SWMM, foi considerada uma parcela da bacia, com área de 0,9 km². As simulações consideraram cenários sem intervenção, com implantação individual e combinada de pavimentos permeáveis, telhados verdes e jardins de chuva. Foram definidas diversas chuvas de projeto, com durações de 30, 60 e 120 minutos e tempos de recorrência (TR) de 2, 5, 10, 15, 50 e 100 anos. Também foi analisada uma chuva real, emblemática, observada em 16/02/2011. Para os cenários individuais, foi considerado que todos os telhados da bacia fossem substituídos por telhados verdes, representando 57% da área impermeável da bacia. Os resultados indicam que as reduções das vazões de pico variam entre 27,24% e 35,96%, 13,03% e 36,08% e 12,86% e 37,23%, para as durações de 30, 60 e 120 minutos, respectivamente. Os cenários com atuação conjunta das medidas de controle foram definidos de forma que a porcentagem da área impermeável tratada da bacia fosse de 20%, 50% e 100%. Os maiores desempenhos - em torno de 50% de redução dos picos de cheia - foram verificados nos cenários com 100% de área impermeável tratada. Nos cenários individuais de telhados verdes foi observado que, o amortecimento das vazões de pico foi maior nos eventos de precipitação com TR entre 5 e 15 anos, para todas as durações definidas. Por outro lado, nos cenários de medidas de controle em conjunto, as maiores reduções ocorrem nos eventos com TR compreendidos entre 2 e 15 anos. Em relação ao evento emblemático, foi obtida uma redução de 43,32% para a atuação individual de telhado verde enquanto que para os cenários com aplicação das medidas em conjunto foram obtidas reduções de 9,71%, 23,84% e 51,45%, referentes respectivamente a 20%, 50% e 100% de área impermeável tratada na bacia.

Leite *et al.* (2016) aplicaram o modelo SWMM para verificação do impacto de telhados verdes nos hidrogramas de cheia no Campus Cuiabá da Universidade Federal de Mato Grosso, que enfrenta problemas recorrentes de alagamentos em diversos pontos. As simulações consideraram os cenários sem intervenção e com substituição de 100% dos telhados existentes por telhados verdes. Foi considerada uma chuva real, ocorrida em 20/02/2015. Os resultados mostraram uma redução de 18% da vazão de pico.

Martins (2017) avaliou o desempenho de diversas técnicas LID (bacias de detenção, pavimentos permeáveis, jardins de chuva, telhados verdes, trincheiras de infiltração e microreservatórios individuais) na bacia do Córrego do Gregório (área de 18,9 km²), localizada no município de São Carlos/SP, que possui a maior parte de sua área urbanizada e algumas parcelas ainda rurais. As simulações no SWMM consideraram a aplicação individual e em conjunta das técnicas. Foram utilizadas chuvas de projeto com duração de 120 minutos e TR de 2, 5, 10, 50 e 100 anos. Tratando-se especificamente dos telhados verdes, o critério adotado para os cenários de simulação estabeleceu que 25% dos telhados existentes fossem convertidos em telhados verdes. Os resultados mostraram que os melhores desempenhos individuais ocorreram no cenário de trincheiras de infiltração, com a taxa de redução de pico variando de 35,50% (TR 2 anos) a 3,81% (TR 100 anos), e no cenário de telhados verdes, com a redução variando de 16,37% (TR 2 anos) a 12,77% (TR 100 anos). Para o cenário com as medidas em conjunto (com exclusão dos jardins de chuva e microreservatórios individuais), os resultados mostraram uma redução da vazão de pico de 59,00% e 25,66%, respectivamente para o TR de 2 e 100 anos.

Nunes *et al.* (2017) apresentam os resultados das simulações na bacia do rio Morto, pertencente à Baixada de Jacarepaguá, Rio de Janeiro. A bacia apresenta característica periurbana e possui uma área de drenagem de 9 km². A parte mais alta da bacia encontra-se inserida dentro de uma Unidade de Conservação de Proteção Integral, o Parque Estadual da Pedra Branca, enquanto que no restante bacia, correspondente aos trechos médios e baixo do rio Sacarrão, principal afluente do rio Morto, verifica-se a presença de condomínio residenciais, pequenos comércios e

assentamentos informais. Os cenários com telhados verdes foram realizados em apenas três sub-bacias com maior grau de impermeabilização, considerando um evento de chuva real, datado de Abril de 2010, considerado como um dos mais críticos para a região. Considerou-se que toda a área das edificações existentes fosse substituída por telhados verdes, em três cenários distintos, correspondendo a 20%, 25% e 50% da área total de cada sub-bacia. Os resultados indicaram uma redução da vazão de pico de 7,8%, 11,1% e 4,1%, respectivamente. O cenário com a inserção de telhados verdes de forma conjunta nas três sub-bacias levou à redução da vazão de pico no exutório da bacia do Rio Morto da ordem de 1,0%.

Rosa (2017) avaliou a simulação de cinco infraestruturas verdes (pavimentos permeáveis, telhados verdes, reservatórios individuais, desconexão de telhados e trincheiras de infiltração) na bacia do Córrego do Leitão (área de 10,6 km²), em Belo Horizonte/MG. Precipitações de projeto de tempos de retorno de 2, 10, 50 e 100 anos, com a duração crítica de 60 minutos, foram simuladas para cada cenário, bem como dois eventos selecionados dentre os observados. Os resultados obtidos revelam que as taxas de redução das vazões de pico decrescem com o aumento dos tempos de recorrência definidos para o estudo. Nos cenários de implantação das infraestruturas verdes em 100%, 50% e 10% das áreas disponíveis, o amortecimento das vazões de pico variou de 66,6% a 73,8%, 44,3% a 56,6, 3,2% a 10,1%, respectivamente. Também foram realizadas simulações com eventos reais de precipitação ocorridos nos dias 14/11/2016 e 12/12/2011, onde os resultados indicaram reduções das vazões de pico de 68,6%, 60,9% e 17,5% no primeiro evento (TR ≈ 1 ano), e 43,7%, 38,5% e 8,4% no segundo evento (TR ≈ 5 anos), respectivamente para os cenários com aplicação das medidas de controle em 100%, 50% e 10% das áreas disponíveis.

Galvane (2018) avaliou a aplicação de técnicas de drenagem sustentável no controle dos escoamentos do Campus Reitor João David Ferreira Lima, da Universidade Federal de Santa Catarina, conhecida como bacia do rio do Meio, com área de drenagem de 4 km², localizada em Florianópolis/SC. As simulações no modelo SWMM consideraram cenários sem intervenção e com utilização de pavimentos permeáveis, telhados verdes e jardins de chuva, de forma conjunta. Foram considerados dois eventos reais de precipitação, ocorridos em 10/01/2018 – 11/01/2018 e 16/01/2018 – 17/01/2018, com precipitação total de 143 mm e 31,6 mm, respectivamente. Os resultados obtidos indicaram uma redução média da vazão de pico de 63,88% e 88,0% para os eventos considerados.

Gonçalves (2018) avaliou a aplicação de telhados verdes na bacia do Centro Olímpico da Universidade de Brasília (UnB). Essencialmente urbana, a bacia de estudo, possui área de 5,43 km² e pertence à Bacia Hidrográfica do lago Paranoá. Foram definidos quatro cenários de simulação, sendo um cenário para a situação natural (sem intervenção) e três com diferentes arranjos de telhados verdes, com porcentagens de ocupação de 6,0%, 6,8% e 12% da área total da bacia. Os resultados demonstraram uma redução de 42,2% até 79,9% das vazões de pico para um evento de chuva real (com TR de 0,09 anos), redução de 31,4% até 55,9% para chuva de projeto com TR de 1 ano, 25,8% até 51,8% para chuva de projeto com TR de 2 anos e redução de 7,2% até 25,7% para chuva de projeto com TR de 10 anos. Também foram realizadas simulações na escala de sub-bacia, sendo escolhidas três sub-bacias com áreas semelhantes e porcentagens bem distintas de área ocupada por telhados verdes. Os resultados mostraram uma redução da vazão de pico de 0,06%, 71,4% e 77%, respectivamente para as bacias que consideraram a ocupação com telhado verde com 0,19%, 12,3% e 54,59% da área total da sub-bacia.

Breckenfeld (2019) adotou o modelo SWMM para modelar a resposta hidrológica de um sistema de telhado verde para chuvas intensas na bacia Parque das Dunas, que possui o exutório na Lagoa do Mirassol, na cidade de Natal/RN. A bacia possui área de drenagem de 0,182 km² e uma ocupação predominantemente de residência unifamiliares e comerciais. As simulações no modelo SWMM consideraram os cenários sem intervenção e com substituição de 25, 50, 75 e 100% dos telhados existentes por telhados verdes. As simulações também contemplaram três eventos reais de

chuva e três configurações nas camadas de substrato (espessura de 5, 10 e 15 cm). Os eventos reais de precipitação ocorreram em 06/07/207 (TR de 64 anos), 11/04/2015 (TR de 2 anos) e 14/06/2014 – 15/06/2014 (TR de 12 anos). Os resultados obtidos revelaram amortecimentos máximos da vazão de pico de 11,79%, 22,95%, 33,41% e 43,61%, respectivamente para cenários com 25%, 50%, 75% e 100% de telhados convencionais substituídos por telhados verdes. Também foi verificado que telhados verdes com substrato de 10 cm e 15 cm resultam em uma maior contribuição para o amortecimento das vazões.

Silva (2019) estudou a aplicação de telhados verdes e pavimentos permeáveis como alternativas para controle de alagamentos urbanos na bacia do Canal da Malária (afluente do rio Tejipió), localizada em Recife/PE e com alto grau de impermeabilização do solo. Foram definidos cenários sem intervenção, com implantação individual e em conjunta das medidas de controle, considerando eventos de precipitação com 180 minutos de duração e TR de 2, 5, 10 e 25 anos, além de uma chuva real ocorrida em 19/01/2018. Nos cenários com implantação das medidas individuais, foi considerada a aplicação de telhados verdes em 25% da área total de telhados existentes na bacia, e a aplicação de pavimentos permeáveis em 25% da área disponível de pavimentos. Para os cenários com as medidas em conjunto, a taxa de aplicação de telhados verdes e pavimentos permeáveis foi aumentada para 50%. Os resultados foram analisados em duas sub-bacias que drenam para o exutório (ponto de controle) da bacia do Canal da Malária, denominadas por sub-bacias 19 e 20. Para os cenários individuais com telhados verdes, as reduções das vazões de pico aumentaram com o acréscimo do TR, variando de 33,20% a 45,70% para a sub-bacia 19, enquanto que, na sub-bacia 20, foi observada uma taxa de redução de 12,17% para todos os tempos de recorrência. Para os cenários individuais com pavimentos permeáveis, as reduções das vazões de pico variaram de 29,46% a 42,70% para a sub-bacia 19, e 5,65% para a sub-bacia 20. Por fim, para os cenários com as medidas em conjunto, as reduções das vazões de pico variaram de 45,39% a 56,83% na sub-bacia 19, e de 35,71% para a sub-bacia 20.

Silva *et al.* (2019) analisaram o desempenho de medidas de controle do escoamento em cenários combinando estruturas de infiltração (telhado verde e pavimento permeável) e armazenamento (reservatório) em uma bacia com 0,0821 km², pertencente à Bacia do Centro-Olímpico, localizada na cidade de Brasília/DF. Foram definidos sete cenários de controle do escoamento combinando as técnicas LID, com o objetivo de reduzir a vazão de pico para uma condição de pré-urbanização. As simulações consideram a chuva de projeto com TR de 10 anos para uma condição de pós-urbanização. Os cenários associando as três medidas de controle foram capazes de atingir a vazão da condição de pré-urbanização, resultando em uma redução da vazão de pico de 76,49%.

CONCLUSÕES

Este trabalho identificou estudos publicados que avaliaram a eficiência na capacidade de retenção de volumes de escoamento superficial em telhados verdes, em bacias urbanas com regimes hidrológicos distintos, pertencentes às regiões Centro-Oeste, Nordeste, Sudeste e Sul do Brasil, a partir da aplicação do modelo SWMM.

Com base nos resultados dos estudos selecionados, é possível observar que a aplicação de telhados verdes funciona como uma técnica de controle dos escoamentos, visando à redução da ocorrência e magnitude de volumes excedentes, a partir do amortecimento das vazões de pico. Entretanto, pode-se constatar que a eficiência desta medida de controle é maior para chuvas com baixos tempos de recorrência, entre 2 e 15 anos, aproximadamente. Para tempos de recorrência mais elevados, os telhados verdes tendem a reduzir seu impacto positivo de amortecimento, devido à saturação do solo de suas camadas de armazenamento. Também verifica-se que a atuação conjunta

de medidas de controle proporciona maiores taxas de redução das vazões de pico, quando comparadas com cenários individuais.

Um fator importante a ser considerado, nos estudos de telhados verdes, corresponde à análise das condições de umidade antecedente do solo, uma vez que, nos períodos úmidos, tal estrutura fornece menor capacidade de armazenamento e retenção de volumes precipitados, do que nas condições de estiagens prolongadas.

Por fim, espera-se que os valores dos parâmetros dos telhados verdes utilizados nos estudos selecionados, compilados e consolidados no presente trabalho, possam servir de referência para o desenvolvimento e aprofundamento de futuras pesquisas de amortecimento do escoamento de águas pluviais em bacias urbanas brasileiras. Como sugestão de trabalhos futuros, destaca-se a importância da avaliação das espécies vegetais para telhados verdes e da realização de estudos empíricos, para confrontar com os resultados gerados pelas simulações computacionais.

REFERÊNCIAS

BALDESSAR, S. M. N.; TAVARES, S. F. (2012). “*Telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada*”. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14, 2012, Juiz de Fora. Anais... Juiz De Fora: ANTAC.

BATTAUS, D. M. A.; OLIVEIRA, E. A. B. (2016). “*O direito à cidade: urbanização excludente e a política urbana brasileira*”. Lua Nova: Revista de Cultura e Política, São Paulo, n. 97, p. 81-106.

BRECKENFELD, K. A. A. (2019). *Eficiência de telhados verdes no controle da geração do escoamento superficial em áreas urbanas por meio de modelagem hidrológica*. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 74 p.

CANABRAVA NETO, E. G.; ALMEIDA, A. K.; LEITE, I. R.; GUARIENTI, J. A.; ALMEIDA, I. K. (2021). “*Telhado Verde: Alternativa Sustentável para a Drenagem do Escoamento Superficial*”. MIX Sustentável, v. 7, n. 2, p. 125-136.

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPCÃO, R. S. F. V.; KLIGERMAN, D. C. (2019). “*A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza*”. Saúde em debate, Rio de Janeiro, v. 43, n. spe3, p. 94-108.

GALVANE, J. V. (2018). *Avaliação de alternativas para a drenagem de água pluvial na bacia hidrográfica do Campus da UFSC*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, 126 p.

GONÇALVES, M. S. (2018). *Monitoramento e modelagem de telhados verdes como técnica de desenvolvimento urbano de baixo impacto*. Monografia (Graduação) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97 p.

LEITE, B. P.; FUJIMURA, J. M.; FERNANDES, J. S. A. (2016). “*Avaliação dos impactos na drenagem com a implantação de telhados verdes na UFMT–Campus Cuiabá utilizando o software SWMM*”. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 6, 2016, Cuiabá. Anais... Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 354-363.

MARTINS, L. G. B. (2017). *Avaliação do potencial de aplicação de técnicas compensatórias em áreas urbanas consolidadas*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 197 p.

MEDEIROS, F. S.; ALMEIDA, M. R.; SOUZA, M. A.; AVELAR, K. E. S. (2020). “A urbanização do município do Rio de Janeiro: uma visão sobre as enchentes e inundações”. *Sustentare*, Minas Gerais, v. 4, n. 1, p. 46-60.

NUNES, D. M. (2017). *Gestão das águas pluviais urbanas e elementos da infraestrutura verde: estudo de caso da Bacia Hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro*. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 166 p.

NUNES, D. M.; FONSECA, P. L.; SILVA, L. P. (2017). “Avaliação do papel dos telhados verdes no desenho e desenvolvimento urbano de baixo impacto ambiental e no controle de enchentes na cidade do Rio de Janeiro”. *Labor e Engenho*, Campinas, SP, v. 11, n. 3, p. 374-393.

OHNUMA JUNIOR, A. A.; MARQUES, M.; PIMENTEL DA SILVA, L. (2017). “Efeitos globais da temperatura e da precipitação em telhados verdes”. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 20, p. 234-251.

ROSA, D. W. B. (2017). *Resposta hidrológica de uma bacia urbana à implantação de técnicas compensatórias de drenagem urbana – Bacia do Córrego do Leitão, Belo Horizonte, Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 218 p.

ROSSMAN, L.A. *Storm Water Management Model – User’s Manual Version 5.1*. Cincinnati, OH: U. S. Environmental Protection Agency, 2015, 352 p.

SILVA, J. F. F. (2019). *Alternativas para controle de alagamentos urbanos utilizando telhados verdes e pavimentos permeáveis em um bairro da cidade do Recife*. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 114 p.

SILVA, C. M.; LIMA, D. L. C.; OLIVEIRA, T. R. P.; COSTA, M. E. L.; SILVA, G. B. L. (2019). “Avaliação de cenários com medidas de controle do escoamento no sistema de drenagem em uma área urbana”. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: ABRH, 2019.

SWMM: *Storm Water Management Model*. Version 5.1.015. United States: Environmental Protection Agency (EPA), 2020. Disponível em: <<https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>>. Acesso em: 1 jun. 2021.

TOMINAGA, E. N. S. (2013). *Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte*. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, 137 p.