

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**MAURÍCIO MARCUZ BUFFO**

**DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL: AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE  
TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS EM BACIA URBANIZADA**

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2022**

**MAURÍCIO MARCUZ BUFFO**

**DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL: AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE  
TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS EM BACIA URBANIZADA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente.  
Orientador: Prof. Dr. Alexandre Silveira.  
Coorientador: Prof. Dr. Frederico Carlos Martins de Menezes Filho.

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2022**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Buffo, Maurício Marcuz.

Drenagem urbana sustentável : avaliação do emprego de técnicas compensatórias em bacia urbanizada / Maurício Marcuz Buffo. - Poços de Caldas, MG, 2022.

61 f. : il. -

Orientador(a): Alexandre Silveira.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) -  
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2022.

Bibliografia.

1. Urbanização. 2. Escoamento superficial. 3. Modelagem hidrológica.  
4. Smm. I. Silveira, Alexandre, orient. II. Título.

## MAURÍCIO MARCUZ BUFFO

### DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL: AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS EM BACIA URBANIZADA

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Aprovada em: 26 de agosto de 2022

Prof. Dr. Alexandre Silveira  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof(a). Dr(a). Maria Clara Fava  
Instituição: Universidade Federal de Viçosa - Campus Rio Paranaíba

Prof. Dr. Flávio Aparecido Gonçalves  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Silveira, Professor do Magistério Superior**, em 30/08/2022, às 16:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Clara Fava, Usuário Externo**, em 31/08/2022, às 13:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Flávio Aparecido Gonçalves, Professor do Magistério Superior**, em 31/08/2022, às 15:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0803323** e o código CRC **5BC98350**.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL campus Poços de Caldas e seu corpo docente, em especial ao Prof. Dr. Alexandre Silveira, e também ao Prof. Dr. Frederico Menezes Filho da Universidade Federal de Viçosa – UFV.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

O crescimento populacional ocorrido nas últimas décadas resultou no aumento dos processos de urbanização de forma desordenada acentuando a ocorrência de problemas relacionados à infraestrutura de água no ambiente urbano, como as enchentes e inundações. Por meio da modelagem hidrológica é possível analisar técnicas compensatórias no intuito de controlar os efeitos adversos oriundos do escoamento superficial urbano e assim readequar ou aumentar a eficiência hidráulica dos sistemas de drenagem. Desta forma, objetiva-se com o presente trabalho avaliar o impacto da implementação de técnicas compensatórias na drenagem urbana aplicada a uma sub-bacia hidrográfica urbanizada por meio de um modelo calibrado e validado. Foram identificadas as áreas susceptíveis à geração, transporte e acúmulo de escoamento superficial e determinadas as técnicas compensatórias a serem instaladas nestas áreas de acordo com as características individuais de cada uma delas. Utilizando o modelo *Storm Water Management Model* (SWMM), foram realizadas simulações com cenários distintos de ocupação e emprego de técnicas compensatórias (controle na fonte e centralizado). Com base nos resultados, observou-se a capacidade no controle dos picos de cheia e do escoamento superficial em função da implementação das técnicas compensatórias através do aumento da capacidade de armazenamento e infiltração de água. O controle centralizado mostrou-se mais eficiente, através da implementação de bacias de retenção, com reduções de 77,81 a 97,77% nas vazões de pico em cada um dos cenários avaliados, seguido do controle na fonte por meio dos microrreservatórios com 44,62% a 69,09% e depois pelos telhados vegetalizados com 18,71% a 40,53%. Além disso, verificou-se que a medida de plantio de vegetação nativa não demonstrou-se eficaz nas análises realizadas, não sendo indicada como forma de mitigar o problema de cheias da sub-bacia hidrográfica.

Palavras-Chave: urbanização; escoamento superficial; modelagem hidrológica; swmm.

## ABSTRACT

Population growth in recent decades has resulted in the increase of urbanization processes in a disorderly way, accentuating the occurrence of problems related to water infrastructures in the urban environment, such as floods. Through hydrological modeling, it is possible to analyze compensatory techniques in order to control the adverse effects arising from urban surface runoff and thus readjust or increase the hydraulic efficiency of drainage systems. This work aimed to evaluate the impact of the implementation of compensatory techniques in urban drainage applied to an urbanized hydrographic sub-basin through a calibrated and validated model. The areas susceptible to the generation, transport and accumulation of surface runoff were identified, and the compensatory techniques to be installed in these areas were determined according to the individual characteristics of each one of them. Using the Storm Water Management Model (SWMM), simulations were performed with different occupation scenarios and the use of compensatory techniques (source and centralized control). Based on the results, the ability to control flood peaks and surface runoff was observed due to the implementation of compensatory techniques by increasing the storage capacity and water infiltration. Centralized control proved to be more efficient, through the implementation of detention basins, with reductions from 77.81 to 97.77% in peak flows in each of the evaluated scenarios, followed by source control through micro-reservoirs with 44.62% to 69.09% and then by the vegetated roofs with 18.71% to 40.53%. In addition, it was found that the measure of planting native vegetation was not effective in the analyzes carried out, not being indicated as a way of mitigating the problem of flooding in the hydrographic sub-basin.

Keywords: best management practices; runoff; hydrological modeling; swmm.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bacia hidrográfica e seu sistema de drenagem. ....	13
Figura 2 - Processo de transformação de chuva em vazão. ....	13
Figura 3 - Hidrograma. ....	16
Figura 4 - Hidrogramas comparativos. ....	17
Figura 5 - Processo de impacto da urbanização na drenagem urbana. ....	18
Figura 6 - Hidrograma hipotético. ....	18
Figura 7 - Representação dos processos de enchente e inundação. ....	19

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medidas Estruturais.....	20
Tabela 2 - Dispositivos de infiltração e armazenamento.....	21
Tabela 3 - Quadro comparativo dos modelos hidrológicos.....	23

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

AMC	<i>Antecedent Moisture Condition</i>
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CHM	<i>Chicago Hydrograph Model</i>
CN	<i>Curve Number</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
ILLUDAS	<i>Illinois Urban Drainage Area Simulator</i>
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
IPT	Instituto de Pesquisa e Tecnologia
LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
LID	<i>Low Impact Development</i>
NSE	Coeficiente de Nash e Sutcliffe
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
STORM	<i>Storage Treatment Overflow Runoff Model</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>13</b>
2.1	BACIAS HIDROGRÁFICAS	13
2.2	PRECIPITAÇÃO	15
2.3	ESCOAMENTO	16
2.4	ENCHENTES E INUNDAÇÕES	17
2.5	TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS	19
2.6	MODELAGEM HIDROLÓGICA	22
2.7	STORM WATER MANAGEMENT MODEL (SWMM)	24
<b>3</b>	<b>SIMULAÇÃO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS PARA CONTROLE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL URBANO: CONTROLE NA FONTE OU CENTRALIZADO?.....</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água é de essencial importância para manutenção da vida na Terra, de modo que os seres humanos a utilizam em diversas atividades. Dentre suas utilizações, pode-se citar o abastecimento de água, o transporte e o tratamento de esgotos, estes também considerados como águas urbanas, tendo como metas a saúde e a conservação ambiental.

O crescimento populacional acentuado nas últimas décadas resultou no aumento dos processos de urbanização (impermeabilização do solo, adensamento das construções, entre outros), o qual atrelados à ocupação desordenada de áreas irregulares foram imprescindíveis para ocorrência de problemas relacionados com a infraestrutura de água no ambiente urbano.

Dentre os principais problemas relacionados com as águas urbanas têm-se a falta de planejamento adequado para sua gestão, desta forma impactando diretamente na drenagem urbana o que correlacionado aos processos de impermeabilização do solo e canalização dos rios urbanos geram enchentes e inundações. As enchentes e inundações são fenômenos naturais e podem ocorrer após precipitações prolongadas ou rápidas e intensas, de modo que o principal problema está ligado às ocupações irregulares em áreas de várzea dos rios, o que em conjunto das intervenções urbanas podem alterar o comportamento hidrológico do local (IPT, 2007).

O ciclo hidrológico impacta diretamente na dinâmica das bacias hidrográficas, de modo que seu estudo é de suma importância no desenvolvimento de projetos que objetivam a contribuição para uma adequada gestão de recursos hídricos. Para isso, podem ser utilizados modelos através da caracterização da bacia hidrográfica e de simulações hidrológicas da região de estudo para conhecer o comportamento dos processos hidrológicos. Estes modelos podem ser classificados de acordo com o tipo de variável utilizada (estocásticos ou determinísticos), as relações existentes entre elas (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos) e a existência, ou não, de relações espaço temporais (concentrados ou distribuídos). Estes modelos hidrológicos podem ser empregados em diversas aplicações para, por exemplo, previsão de enchentes e inundações, avaliação da qualidade de água e também de disponibilidade hídrica.

O *Storm Water Management Model* (SWMM,) desenvolvido nos Estados Unidos pela *Environmental Protection Agency* (EPA), é um do modelo hidrológico utilizado em estudos de drenagem urbana. É uma ferramenta computacional de modelagem do ciclo hidrológico capaz de simular seus processos qualitativa e quantitativamente, além da vantagem de ser um software de domínio público livre com código fonte aberto, possibilitando assim sua utilização nas mais diversas aplicações e adaptações de condições específicas (LENHS, 2012).

Por meio da modelagem hidrológica podem ser desenvolvidas e analisadas técnicas compensatórias com intuito de controlar os efeitos adversos oriundos do escoamento superficial urbano e assim readequar ou aumentar a eficiência hidráulica dos sistemas de drenagem, reduzindo então a ocorrência de enchentes e inundações urbanas. A escolha, ao que melhor se adapta a bacia hidrográfica de estudo, tem como foco os processos de infiltração e armazenamento da água proveniente de eventos de precipitação (RABORI *et al.*, 2017).

Neste contexto, a sub-bacia hidrográfica do Vai e Volta localizada no município de Poços de Caldas – MG apresenta um histórico de inundações decorrentes da falta de planejamento adequado para a gestão das águas urbanas, uma vez que o alto grau de urbanização e elevados índices pluviométricos tornam-se características para ocorrência destes eventos. Desta forma, estudos aplicados ao amortecimento de cheias, ao aumento nos tempos de concentração da bacia hidrográfica e à redução das vazões máximas, são de extrema importância para o controle e/ou prevenção dos impactos das inundações.

Objetiva-se com o presente trabalho avaliar o emprego do uso de técnicas compensatórias em cenários distintos de uso e ocupação do solo por meio de um modelo calibrado e validado para uma bacia hidrográfica urbana no município de Poços de Caldas – MG.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS

A bacia hidrográfica é considerada uma área de captação natural da água de forma a qual converge o escoamento gerado pela precipitação da chuva para um único ponto de saída, denominado exutório (FIGURA 1) (ANA, 2012).

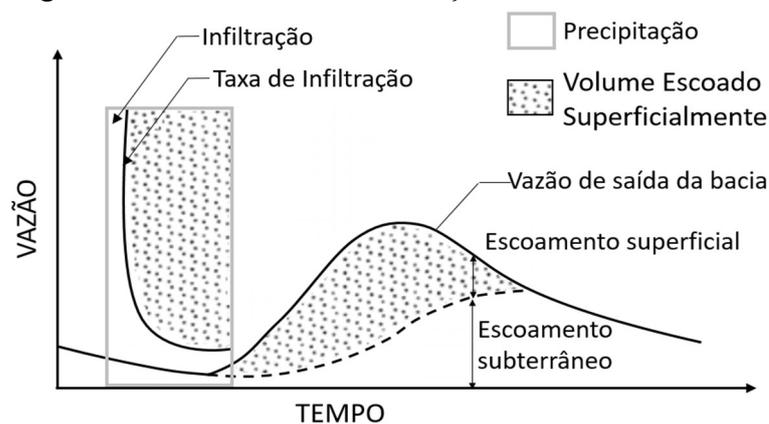
Figura 1 - Bacia hidrográfica e seu sistema de drenagem



Fonte: ANA (2012, p. 5).

Segundo Tucci (2004), a bacia hidrográfica é um sistema físico, composto por entradas e saídas, sendo elas o volume de água precipitado e o volume de água o qual escoo pelo exutório, respectivamente, levando em consideração também as perdas intermediárias por evaporação, transpiração e infiltração. Quando se tratando de eventos isolado, as perdas intermediárias podem ser desconsideradas e desta forma o processo de transformação de chuva em vazão pode ser analisado através da Figura 2.

Figura 2 - Processo de transformação de chuva em vazão



Fonte: Adaptado de Tucci (2004).

A figura acima demonstra os processos hidrológicos da bacia hidrográfica, a qual transforma o volume de entrada, em determinado tempo, em um volume de saída, de maneira distribuída. Estes processos recebem o nome de precipitação e escoamento, respectivamente (TUCCI, 2004).

As características morfométricas de uma bacia hidrográfica apresentam indicativos para identificação e entendimento de processos erosivos, inundações e enchentes e também para implementação de medidas mitigadoras. De acordo com ANA (2012), pode-se destacar como as principais variáveis:

Área: fator fundamental para determinação do escoamento gerado em uma bacia hidrográfica, visto que multiplicando a lâmina de água da chuva por ela, define-se o volume total de água precipitada.

Declividade: elemento significativo na modelagem do escoamento, visto que a velocidade do fluxo de água é dependente da declividade. Fundamenta-se na razão entre a diferença nas cotas dos pontos mais alto e baixo do corpo hídrico, pelo seu comprimento total.

Índices de forma: o formato de uma bacia hidrográfica representa, em grande parte, seu comportamento hidrológico, uma vez que através dele é possível determinar tendências à ocorrência de inundações e enchentes, como é o caso para feições circulares as quais possuem mais propensão do que as alongadas.

Densidades de drenagem: serve como base para identificar aspectos geológicos e do relevo da bacia hidrográfica. Através dela é possível mensurar a eficácia de drenagem de modo que quanto maior este índice, maior a capacidade de existirem escoamentos elevados no exutório. Geralmente é utilizado como base para estudos de regionalização ou transposição de dados hidrológicos, uma vez que possibilita a análise de comparação entre bacias hidrográficas diferentes. Segundo Tucci (2004), pode-se calcular a densidade de drenagem através da razão do comprimento total dos canais pela área da bacia hidrográfica ou pelo número total de corpos hídricos existentes nela.

Tempo de concentração: corresponde ao tempo necessário para que o escoamento superficial percorra os pontos extremos da bacia hidrográfica, sendo do mais distante até seu exutório.

## 2.2 PRECIPITAÇÃO

Precipitação é a denominação dada a umidade, independentemente de sua forma, proveniente da atmosfera, a qual é depositada na superfície terrestre, podendo ocorrer na forma de chuva, granizo, neblina, neve, orvalho ou geada. Sua formação dá-se pelas massas de ar quentes que ascendem e ao resfriarem, e atingirem o ponto de saturação, se condensam em formas de gotículas suspensas. Ao sofrerem algum processo de turbulência ou vibração por parte de descargas elétricas ou outro processo de aglutinação ocorre a precipitação (RIGHETTO, 1998).

No Brasil, geralmente a precipitação é sinônimo de chuva, uma vez que as outras formas existentes, como neve, granizo, neblina, entre outros, representam uma parcela pequena no ciclo hidrológico e são incomuns de ocorrerem na região (ALMEIDA *et al.*, 2017).

Segundo Righetto (1998), Tucci (2004), a precipitação pode ser caracterizada através de grandezas distintas: altura, duração, intensidade e frequência. É por meio delas que pode-se descrever o volume de chuva que precipitou, medido em milímetros (mm) (Altura), e está, quase sempre, relacionada a um intervalo de tempo (min ou h) (Duração); sua variabilidade temporal, a qual é tida como a variação da lâmina d'água precipitada por unidade de tempo (mm/h ou mm/min) (Intensidade); e por se tratar de fenômenos aleatórios, o número de ocorrências da precipitação em um determinado tempo e a frequência de ocorrência (Frequência).

A maior parte dos problemas relacionados à drenagem, como alagamento de ruas, inundações de edificações, entre outros dá-se pela ocorrência de precipitações intensas, ou seja, quando há um evento de precipitação, que apresenta uma ou mais de suas grandezas com valores elevados. Assim, através do comportamento das chuvas intensas, são dimensionadas as obras de drenagem, de forma a trazer segurança à população (ALMEIDA *et al.*, 2017; RIGHETTO, 1998). De acordo com Tucci (2004), as precipitações intensas podem ser retratadas pontualmente pelas curvas de intensidade, duração e frequência, denominadas de IDF, a qual utiliza de análises estatísticas de séries históricas de precipitações.

Os eventos de precipitação podem ser monitorados através de pluviômetros ou pluviógrafos. O pluviômetro é um equipamento totalizador o qual registra o volume de chuva total acumulada em um dado período, já o pluviógrafo é um aparelho automático o qual registra as variações de precipitação de forma contínua, assim gerando um gráfico da altura de água precipitada no evento em função do tempo, este gráfico é conhecido como pluviograma (TUCCI, 2004).

## 2.3 ESCOAMENTO

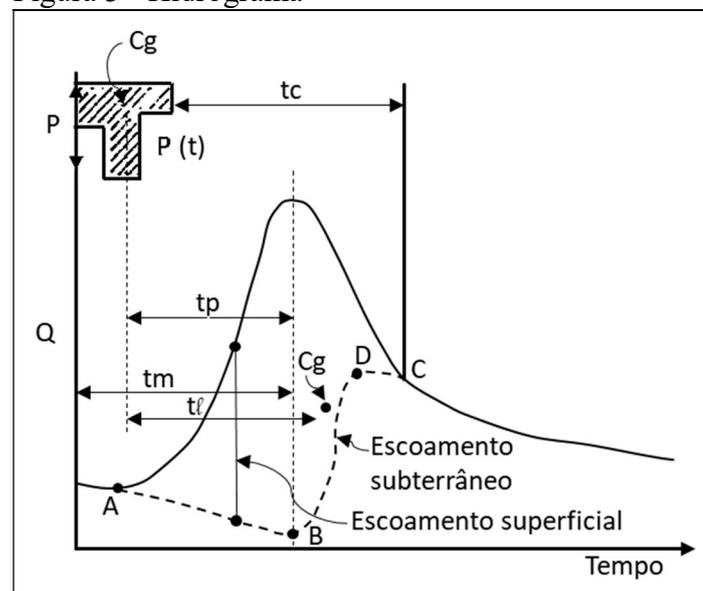
O escoamento superficial é um dos componentes do ciclo hidrológico e caracteriza-se pelo fluxo da água na superfície do solo e corpos hídricos, tendo sua origem, fundamentalmente, nas precipitações, como parcela de chuva a qual não infiltrou no solo (RIGHETTO, 1998).

Segundo Barbosa (2014), o escoamento superficial sofre influência de fatores climáticos (eventos de precipitação), fisiográficos (relevo da bacia hidrográfica) e antrópicos (uso e ocupação do solo e obras hidráulicas). O deflúvio de uma bacia hidrográfica pode ser caracterizado através de grandezas como: precipitação efetiva, coeficiente de escoamento superficial, tempo de concentração, vazão do corpo hídrico principal, sua frequência de ocorrência e o nível de água.

As vazões máxima, mínima e média de longa duração são utilizadas como forma de caracterizar as condições do escoamento superficial. Uma vez que os dados de vazão mínima são empregados em estudos de disponibilidade hídrica; os dados de vazão média são utilizados em projetos de regularização de vazões; e os dados de vazão máxima em cálculos de projetos de obras hidráulicas e em estudos de identificação e controle de inundações e enchentes (PRUSKI *et al.*, 2006).

De acordo com Tucci (2004), ao relacionar a vazão gerada pela chuva ao longo do tempo, tem-se o elemento gráfico denominado hidrograma, de modo que seu comportamento, após um evento individual de precipitação, se assemelha ao apresentado pela Figura 3, para uma dada bacia hidrográfica genérica.

Figura 3 - Hidrograma

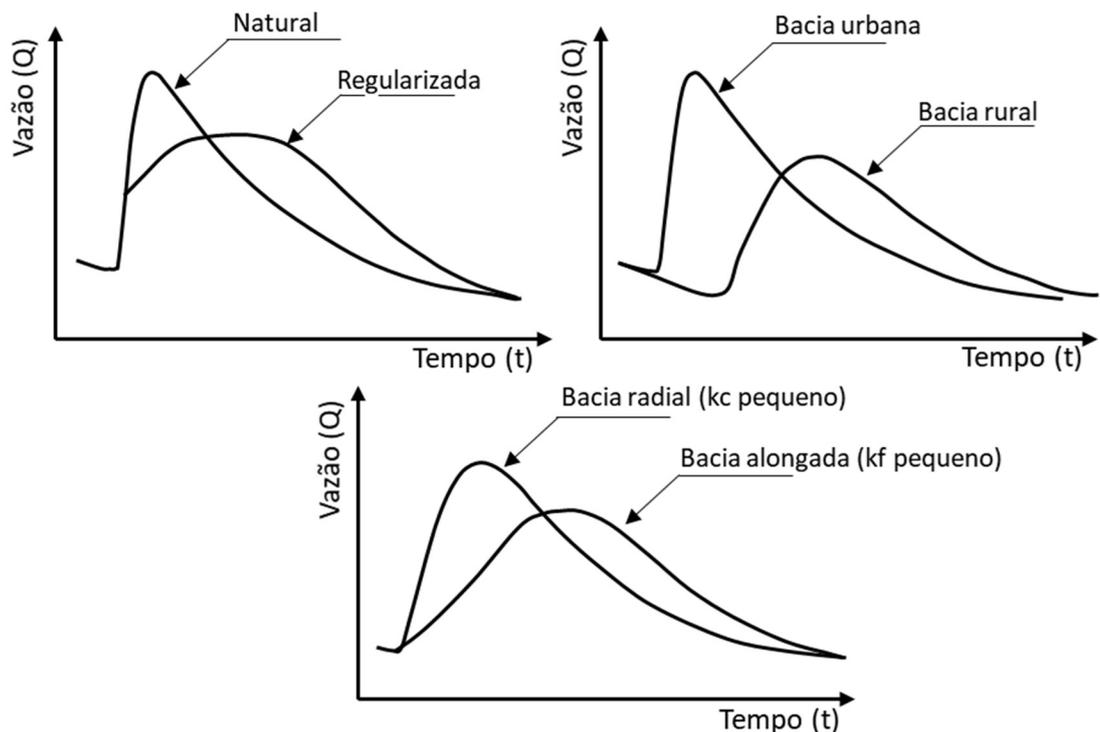


Fonte: Adaptado de Tucci (2004).

No início do evento, existe um determinado intervalo de tempo para que as vazões comecem a aumentar. Isso ocorre devido a algumas perdas, geralmente acúmulos na superfície do solo, interceptação vegetal e também o tempo para que a água percorra todo seu caminho até o exutório. Passado este retardo, as vazões então começam a aumentar gradativamente, atingindo assim o pico da curva; neste momento observa-se em sua maioria o escoamento superficial. Attingido o pico de vazão, tem-se um decréscimo contínuo na curva de vazão, e é possível identificar um ponto de inflexão, este que caracteriza o fim do escoamento superficial; após este ponto o escoamento é predominante no subterrâneo (TUCCI, 2004).

Segundo Barbosa (2014), o hidrograma sofre influência de diversos fatores, como uso e ocupação do solo, relevo da bacia hidrográfica, modificações antrópicas no corpo hídrico, das próprias características do evento de precipitação, o nível de umidade no solo e seu tipo. A Figura 4 abaixo representa algumas destas influencias em seu comportamento.

Figura 4 - Hidrogramas comparativos



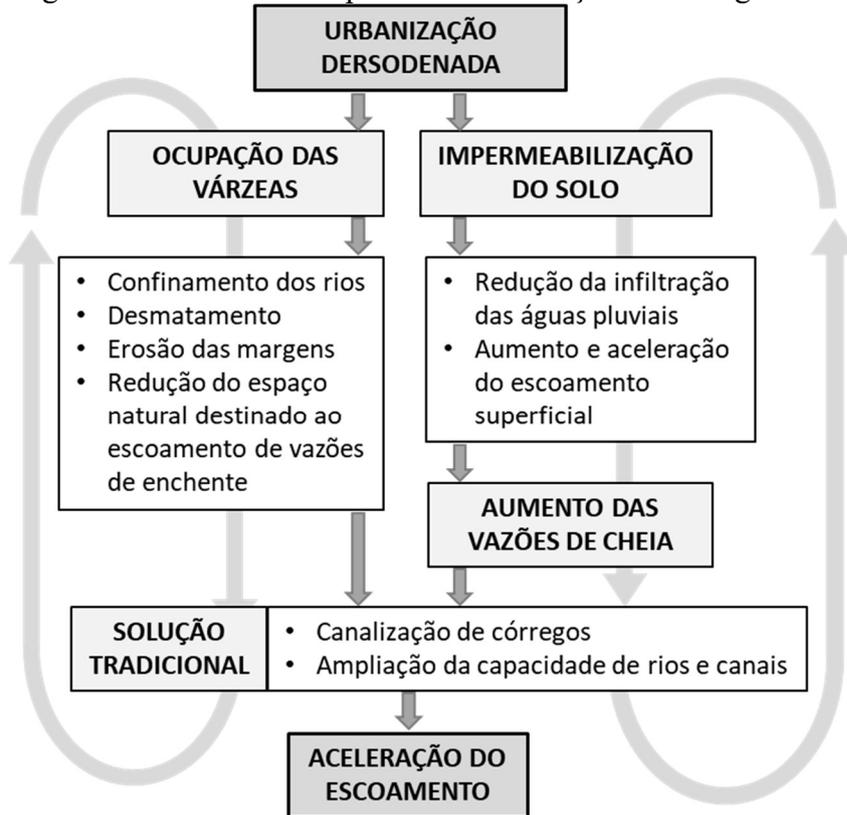
Fonte: Autor.

## 2.4 ENCHENTES E INUNDAÇÕES

O elevado crescimento populacional nas últimas décadas implementou diversos elementos antrópicos nas bacias hidrográficas em detrimento da urbanização, como impermeabilização e compactação do solo, adensamento das construções, canalização de

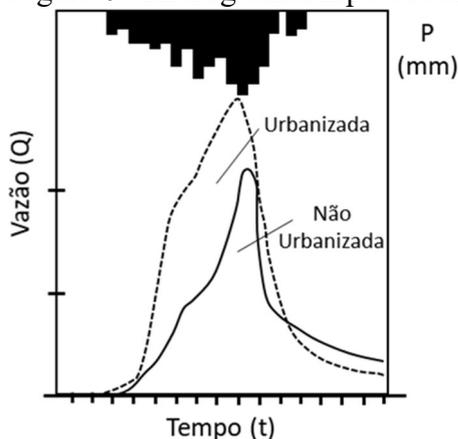
corpos hídricos, entre outros. Estes processos, representados pela Figura 5, atrelados a ocupação de áreas inadequadas são fatores que corroboram para ocorrência de problemas ligados a gestão das águas urbanas, sendo um de seus maiores impactos as enchentes e inundações. Os hidrogramas típico de uma bacia natural e aquele resultante da urbanização são apresentados na Figura 6 (TUCCI, 2007).

Figura 5 - Processo de impacto da urbanização na drenagem urbana



Fonte: Autor.

Figura 6 - Hidrogramas hipotéticos



Fonte: Autor.

As enchentes estão associadas a uma elevação do nível do corpo hídrico, porém limitada dentro de seu leito. Já as inundações correspondem a elevação não usual do nível d'água, a qual provoca o extravasamento do canal e a ocupação da área de várzea, estes processos são exemplificados na Figura 7 (BARBOSA, 2014).

Figura 7 - Representação dos processos de enchente e inundação



Fonte: IPT (2007, p. 92).

Uma nova abordagem surgiu como alternativa aos sistemas clássicos de gestão de águas urbanas, os quais limitavam-se basicamente na captação e condução das águas através de condutos, estes em sua maioria subterrâneos, e eventualmente algumas obras complementares, esta nova abordagem trata do desenvolvimento sustentável com intuito de solucionar e/ou mitigar os efeitos dos processos urbanísticos que impactam direta e indiretamente o ciclo hidrológico (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2007).

## 2.5 TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS

As técnicas compensatórias, são um segmento do desenvolvimento sustentável, as quais atuam nos sistemas de drenagem de forma a regularizar ou elevar a eficiência hidráulica, assim desenvolvendo um papel no controle de enchentes e inundações urbanas.

Segundo o Ministério das Cidades (2007), estas tecnologias alternativas têm como base a bacia hidrográfica como objeto central do estudo, assim considerando os impactos provenientes da urbanização de maneira global, tendo como principais vantagens a modulação do sistema de drenagem em função do crescimento urbano, consequentemente permitindo a continuidade do desenvolvimento urbano sem gerar custos excessivos para as municipalidades, além de combinar a gestão de águas urbanas com aspectos urbanísticos das cidades.

As técnicas compensatórias de controle de inundações constituem um conjunto de medidas estruturais e não estruturais que atuam direta e indiretamente na drenagem urbana,

assim as medidas não estruturais são de cunho social, econômico e administrativo, visando então a redução dos prejuízos causados e uma melhor convivência com as enchentes, e são desenvolvidas através do controle de ocupação urbana, sistemas de alerta, seguros e educação ambiental. Já as medidas estruturais baseiam-se na modificação dos sistemas de águas urbanas através de obras de engenharia, podendo elas serem extensivas (atuam nas bacias e modificam o processo precipitação-vazão) ou intensivas (agem diretamente nos corpos hídricos, subdividindo-se em três componentes: aceleração do escoamento, retardo de escoamento e desvio de escoamento). Na Tabela 1 estão apresentadas as características dessas medidas, com um foco nas estruturais que são o objeto de estudo deste projeto (TUCCI, 2004).

Tabela 1 - Medidas estruturais

<b>MEDIDA</b>	<b>PRINCIPAL VANTAGEM</b>	<b>PRINCIPAL DESVANTAGEM</b>	<b>APLICAÇÃO</b>
<b>MEDIDAS EXTENSIVAS</b>			
Cobertura vegetal	Redução do pico de cheia	Impraticável para grandes áreas	Pequenas bacias
Controle de perda	Reduz assoreamento	Idem ao anterior	Pequenas bacias
<b>MEDIDAS INTENSIVAS</b>			
Diques e polders	Alto grau de proteção de uma área	Danos significativos caso falhe	Grandes rios
<i>Melhoria do canal:</i>			
Redução da rugosidade por desobstrução	Aumento da vazão com pouco investimento	Efeito localizado	Pequenos rios
Corte de meandro	Amplia a área protegida e acelera o escoamento	Impacto negativo em rio com fundo aluvionar	Área de inundação estreita
<i>Reservatórios:</i>			
Todos os reservatórios	Controle a jusante	Localização difícil	Bacias intermediárias
Reservatórios com comportas	Mais eficiente com o mesmo volume	Vulnerável a erros humanos	Projetos de usos múltiplos
Reservatórios para cheias	Operação com o mínimo de perdas	Custo não partilhado	Restrito ao controle de enchentes
<i>Mudança de Canal:</i>			
Caminho da cheia	Amortecimento do volume	Depende da topografia	Grandes bacias
Desvios	Reduz vazão do canal principal	Idem ao anterior	Bacias médias e grandes

Fonte: Simons *et al.* (1977) apud Tucci (2004, p. 621).

Segundo Tucci (2005) as medidas estruturais são classificadas de acordo com sua área de atuação nas bacias hidrográficas, como distribuída ou na fonte (impacta os lotes, passeios e praças); na microdrenagem (atua no hidrograma resultante de um ou mais loteamentos); na macrodrenagem (atuação direta nos corpos hídricos). As principais técnicas podem ser organizadas segundo sua maneira de atuação, como infiltração e percolação, e armazenamento de entrada e jusante.

Dentre as principais medidas de controle atuantes no incremento de infiltração e percolação têm-se: bacias de percolação; lagoas de infiltração; pavimentos porosos; poços de infiltração; superfícies de infiltração; e valas ou valetas de infiltração. Para as medidas atuantes no armazenamento incluem-se: controle em áreas impermeáveis; controle nos telhados; bacias de retenção; bacias de retenção (BAPTISTA *et al.*, 2005; CANHOLI, 2005; TOMINAGA, 2013).

Na Tabela 2 a estão apresentadas as técnicas mais comumente utilizadas descrevendo suas características, vantagens e desvantagens.

Tabela 2 - Dispositivos de infiltração e armazenamento

(continua)

DISPOSITIVO	CARACTERÍSTICAS	VANTAGENS	DESVANTAGENS
<b>INFILTRAÇÃO</b>			
Planos e valas de infiltração com drenagem	Gramados, áreas com seixos ou outro material que permita a infiltração natural	Permite infiltração de parte da água para o subsolo	Planos com declividade > 0,1% não devem ser usados; o material sólido para a área de infiltração pode reduzir sua capacidade de infiltração
Planos e valas de infiltração sem drenagem	Gramados, áreas com seixos ou outro material que permita a infiltração natural	Permite infiltração da água para o subsolo	O acúmulo de água no plano durante o período chuvoso não permite trânsito sobre a área. Planos com declividade que permita escoamento
Pavimentos permeáveis	Concreto, asfalto ou bloco vazado com alta capacidade de infiltração	Permite infiltração da água	Não deve ser utilizado para ruas com tráfego intenso e/ou de carga pesada, pois a sua eficiência pode diminuir
Poços de infiltração, trincheiras de infiltração e bacias de percolação	Volume gerado no interior do solo que permite armazenar a água e infiltrar	Redução do escoamento superficial e amortecimento em função do armazenamento.	Pode reduzir a eficiência ao longo do tempo, dependendo da quantidade de material sólido que drena para a área

Tabela 3 - Dispositivos de infiltração e armazenamento

(conclusão)

<b>ARMAZENAMENTO</b>			
Controle em áreas impermeáveis	Pequenos reservatórios ou dispositivos que armazenam a água precipitada através da inundação de pontos específicos e retardam o escoamento	Vasta gama de aplicabilidade	Pequeno volume de água retido
Controle nos telhados	Sistema presente nos telhados de edificações capazes de armazenar a água da chuva por determinado período	Utilizável em regiões densamente urbanizadas, sem necessidade de dispor de qualquer área	Limitada a área dos telhados das edificações
Bacias de detenção	Bacias secas que detém a água temporariamente com liberação rápida após o evento	Melhor opção para bacias que possuem grandes déficits de capacidade no sistema de drenagem	Não apresenta aspectos visualmente agradável, necessidade da remoção do lodo acumulado e proteção contra queda de pessoas e animais
Bacias de retenção	Espelhos d'água que detém a água temporariamente com lenta liberação	Apresenta função paisagística, atuam na melhoria da qualidade da água	Necessidade de manutenção para controle de animais e vetores de doenças, bem como para evitar a utilização para descarte de lixo ilegal

Fonte: Adaptado de Tucci (2005).

Os impactos da implementação de cada uma das técnicas, bem como sua viabilidade e eficiência, podem ser determinados através de simulações provenientes da modelagem hidrológica.

## 2.6 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Os modelos hidrológicos de simulação são ferramentas essenciais no desenvolvimento de estudos hidrológicos. Consistem na representação simplificada da realidade, de maneira a retratar fielmente o comportamento existente nas bacias hidrográficas, através de equações e procedimentos computacionais baseados em diversos parâmetros e variáveis, estando limitados quanto a heterogeneidade física da bacia e seus processos inter-relacionados (TUCCI, 2005).

Segundo Collodel (2009), os modelos vêm sendo empregados gradativamente em estudos ambientais, como forma de compreender o impacto das ações antrópicas no meio e suas progressões futuras, tendo como seu principal objeto de estudo a água, principalmente relacionada ao seu fluxo e suas interações com a superfície terrestres da bacia hidrográfica.

A utilização de modelos hidrológicos atrelado ao monitoramento hidrológico vem ganhando destaque na área de planejamento, juntamente com o desenvolvimento de instrumentos reguladores, possibilitando assim, sua utilização como referência para gestão dos recursos hídricos (AGUIAR, 2017).

Com a grande difusão de modelos computacionais uma gama com as mais diversas aplicabilidades foi criada, de modo que cada um deles tem seu próprio método de simulação o que resulta em funcionalidades distintas. Desta forma, na Tabela 3, está apresentada a comparação dos modelos hidrológicos mais utilizados na área de drenagem urbana (COLLODEL, 2009).

Tabela 4 - Comparação dos modelos hidrológicos

CAPACIDADE DE SIMULAÇÃO	MODELOS				
	CHM	ILLUDAS	STORM	IPHS1	SWMM
Múltiplas sub-bacias	O	O	X	O	O
Entrada de diversos hietogramas	O	X	X	O	O
Evaporação	O	X	O	X	O
Degelo	X	O	O	X	O
Escoamento de base	O	O	X	O	O
Escoamento de superfície de áreas impermeáveis	O	O	O	O	O
Escoamento de superfície de áreas permeáveis	O	O	O	O	O
Áreas diretamente conectadas	X	O	X	X	O
Balanço hídrico entre eventos	O	X	O	O	O
Escoamento em sarjetas	O	O	O	X	O
Propagação em galerias	O	O	O	O	O
Múltiplas seções transversais	X	X	X	X	O
Escoamento sob pressão	X	X	X	X	O
Derivação	X	O	O	O	O
Estações-elevatórias	X	O	X	X	O
Armazenamento	X	O	O	O	O
Cálculo de nível	X	O	X	O	O
Cálculo de velocidades	X	O	X	O	O
Simulação contínua	X	X	O	O	O
Escolha do passo de tempo	O	O	X	O	O
Cálculo de projetos	O	O	X	O	O
Código computacional disponível	O	O	O	O	O

O - Permite a simulação  
X - Não permite a simulação

Fonte: Adaptado de Collodel (2009).

Nota-se então que de acordo com o que foi apresentado anteriormente, o modelo hidrológico conhecido como SWMM apresenta uma maior aplicabilidade no potencial de simulações, tendo então sua escolha fundamentada neste princípio.

## 2.7 STORM WATER MANAGEMENT MODEL (SWMM)

O SWMM é um modelo computacional hidrológico dinâmico, desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) em 1971. Amplamente utilizado em estudos de drenagem urbana, por se tratar de um software de domínio público livre com código de fonte aberto, permite a simulação dos processos do ciclo hidrológico de maneira qualitativa e quantitativa (LENHS, 2012).

Disponível atualmente na versão 5.2, o SWMM baseia-se na transformação chuvavazão e possibilita uma simulação de eventos isolados como também de projeções contínuas de longo prazo. Deste modo, constitui-se como ferramenta que pode incorporar técnicas compensatórias aos mais variados cenários de drenagem urbana, permitindo que o usuário trabalhe com o nível de detalhe desejado, sendo macro ou microdrenagem (TOMINAGA, 2013).

Segundo Schuster (2018), algumas das aplicabilidades do SWMM são: concepção e dimensionamento do sistema de drenagem urbana e estruturas de retenção, bem como acessórios, no controle de inundações; delimitação de zonas de inundação em leitos naturais; análise do efeito de medidas compensatórias; e a avaliação do impacto de contribuições e infiltrações sobre o transbordamento de sistemas de drenagem.

O modelo permite trabalhar com determinados dados de entrada, os quais são essenciais para seu correto funcionamento, tendo como parâmetros básicos de entrada: área das sub-bacias; dados de precipitação; situação da impermeabilização do solo; comprimento, cotas e diâmetro dos condutos; tempo de retorno e concentração; equação de infiltração. Vale lembrar que estes são os parâmetros mínimos para que seja possível gerar vazões de escoamento, sendo assim o software permite a introdução de diversos dados de modo a caracterizar precisamente a área de estudo (SHINMA, 2011).

No contexto da utilização de técnicas compensatórias para o controle e mitigação dos sistemas de drenagem, diversos estudos foram realizados empregando-as com simulações computacionais de forma a prever seus efeitos.

Visando avaliar o comportamento e a eficiência de técnicas compensatórias na drenagem urbana, Lee *et al.* (2012) analisaram e avaliaram a redução de eventos de inundação

através de combinações das técnicas (trincheiras de infiltração, microrreservatórios, valas de infiltração, células de bio-retenção e poços de infiltração) na bacia hidrográfica do Rio Jagjaj na Coreia do Sul. Foi utilizado um modelo hidrológico calibrado e validado através do SWMM com simulações realizadas para chuvas com período de retorno de 50 a 100 anos. Os resultados apontaram uma redução em eventos de inundação de 56% a 64% e na vazão de pico da bacia hidrográfica no intervalo de 7% a 15% quando comparadas com o cenário sem inserção das técnicas.

Gironás *et al.* (2009) analisaram o impacto das técnicas compensatórias para uma bacia hidrográfica urbana com precipitações variando seu período de retorno em 2, 5 e 100 anos, e verificaram que tais medidas apresentam reduções consideráveis nas vazões de pico (36%, 33% e 21%) e nos volumes escoados (14%, 7% e 3%) para os cenários avaliados.

Josimovic e Alam (2014) avaliaram a implantação técnicas compensatórias distintas em uma bacia hidrográfica urbana e que a implementação das mesmas, em diversas configurações, conseguiu reduções do escoamento superficial entre 52% a 5% do volume total precipitado.

Palla e Gnecco (2015) estudaram os efeitos da implementação de técnicas LID através do SWMM calibrado manualmente, na bacia Colle Ometti na Itália. Observaram que através das técnicas de telhados vegetalizados e pavimentos permeáveis foi possível reduzir a vazão máxima em 45%, 37% e 31% e no volume total escoado de 23%, 17% e 14%, para os cenários simulados. Concluíram ainda que a redução das áreas impermeáveis através da implementação das técnicas como medidas de controle e gestão das águas pluviais é eficiente.

Rodrigues (2020), utilizou de metodologia para alocação das técnicas compensatórias na bacia do córrego da Conceição em Viçosa/MG, e simulou a implementação das mesmas de acordo com o critério locacional proposto. Os resultados apontaram uma ocupação de 54,2% da área total de bacia hidrográfica com destaque para o plantio de vegetação nativa em 36,9%, equivalente a uma área de 100,25ha. Em relação ao impacto causado no sistema de drenagem, foi verificado uma diminuição no número de pontos de alagamento em aproximadamente 67%, com uma redução da lâmina de escoamento de 85mm para 23mm e aumento na infiltração de 12mm para 38mm, sendo os resultados relacionados ao conjunto de todas as técnicas implementadas.

Silva (2007), Silva (2010), Zanandrea (2016), Martins (2017) e Schuster (2018) utilizaram do SWMM para realizar estudos do impacto causado sobre o sistema de drenagem urbano com a implantação de medidas compensatórias nas cidades de Goiânia/GO, Recife/PE, Porto Alegre/RS, São Carlos/SP e São José do Hortêncio/RS, respectivamente.

Técnicas de controle na fonte como microrreservatórios e telhados vegetalizados são indicadas para atenuar os efeitos da precipitação direta e reduzir o escoamento superficial em áreas urbanas e densamente ocupadas. Desta forma, buscando identificar o impacto das técnicas com controle na fonte, Shin *et al.* (2013) avaliaram o comportamento da implementação de telhados vegetalizados e pavimentos permeáveis, através do SWMM, na bacia do Rio Suyeong na Coreia do Sul. Foram simulados três cenários distintos, sendo um deles sem técnicas compensatórias, e outros dois com cada uma das técnicas citadas. No caso dos telhados vegetalizados, observaram uma redução no escoamento superficial de 15%, considerando a instalação em todas as edificações comerciais prédios públicos e outras estruturas de tamanhos maiores e 50% para residências. Já para os pavimentos permeáveis houve uma redução de 13%, instalando em ruas e vias menos movimentadas e em estacionamentos.

Carvalho *et al.* (2017), utilizando o SWMM, quantificaram o impacto do uso de cisternas como medida compensatória na atenuação de picos de cheia na bacia do riacho Pajeú em Fortaleza. A bacia foi discretizada em 8 sub-bacias, onde para as simulações utilizaram uma chuva de projeto com tempo de duração de 4 horas e período de retorno de 5 anos. Os resultados obtidos indicaram uma redução considerável (64%) na vazão máxima de escoamento ao implementar cisternas em 50% da área total da bacia hidrográfica.

Ahiablame *et al.* (2013) avaliaram a influência de diferentes cenários construídos para implementação de cisternas, microrreservatórios e pavimentos permeáveis para duas bacias distintas próximas a Indianapolis nos Estados Unidos, estas altamente urbanizadas, com grau de ocupação comercial/industrial superior a 95%. Para tal foi utilizado um modelo calibrado e validado das regiões de estudo com coeficientes de NSE entre 0,60 e 0,50. Foi observado que as tais técnicas LID, resultaram em uma redução de escoamento superficial entre 2 e 12% a depender da configuração simulada, e que os cenários com ocupação de 50% microrreservatórios/cisternas, 50% pavimentos permeáveis e a combinação de 25% microrreservatórios/cisternas com 25% pavimentos permeáveis foram eficientes na mitigação do cenário atual das bacias.

Leite *et al.* (2016) analisaram o impacto gerado pela implementação dos telhados vegetalizados, através do SWMM, na ocorrência de alagamentos no *campus* Cuiabá da Universidade Federal do Mato Grosso. Foram comparados o cenário atual com outro considerando ocupação de 100% das áreas edificadas com a técnica e observaram uma redução de 18% na vazão de pico, demonstrando assim a viabilidade no amortecimento das cheias e se mostrando uma alternativa viável como forma de solução para dos pontos de alagamento.

Ling e Mah (2015) avaliaram a incorporação de telhados vegetalizados em um complexo de prédios comerciais na área central de Kota Samarahan na Malásia através do SWMM utilizando um modelo calibrado e validado. Foram utilizadas como chuva de projeto dois eventos de precipitação com histórico de maior volume no ano de 2014, e diversos cenários com configurações variadas de telhados vegetalizados, e através das simulações observaram reduções de 73,5% a 86,9% do volume gerado pelas precipitações.

Qin *et al.* (2013) estudaram o desempenho da utilização de valas vegetadas, pavimentos permeáveis e telhados vegetalizados, em ampla aplicação, para eventos de precipitação distintos, utilizando o SWMM, em uma bacia na China, e obtiveram bons resultados com relação a resposta dos hidrogramas, ordenando assim a sua efetividade (área ocupada x detenção de volume), tendo pavimentos permeáveis seguido por telhados vegetalizados e por fim as valas vegetadas.

Nunes *et al.* (2017) estudaram a aplicação de trincheiras de infiltração e pavimentos permeáveis como técnicas de controle do escoamento superficial gerado por eventos de precipitação em um loteamento residencial em Jacarepaguá/RJ, através do SWMM, e identificaram uma redução de 55% utilizando apenas as trincheiras de infiltração e 93% para combinação de ambas as técnicas.

Versini *et al.* (2015) investigaram o impacto dos telhados vegetalizados em uma bacia urbanizada através do SWMM, e observaram que através implementação desta técnica em 100% das áreas passíveis de alocação foi possível reduzir em 60% as vazões máximas no exutório, bem como o escoamento superficial em 45%. Ainda analisaram um cenário mais próxima da realidade, com apenas 10% de taxa de ocupação da técnica, e concluíram que a redução dos mesmos parâmetros seria de 16 e 20%, respectivamente.

Silva (2016) estudou o impacto da implementação de microrreservatórios em um loteamento na bacia do córrego Mineirinho em São Carlos/SP, e observou que a técnica é eficiente na redução das vazões máximas geradas por lote, obtendo uma diminuição de 44% na vazão de pico no exutório do loteamento.

As técnicas de controle centralizado são indicadas para extensas áreas de drenagem com intuito de mitigar enchentes e inundações através da redução do pico de cheia e/ou armazenamento de água. Buscando avaliar o impacto da implementação deste tipo de técnica, Souza *et al.* (2019) através de simulações utilizando um modelo calibrado e validado no SWMM, avaliaram 13 cenários distintos com alternativas locais diferentes para bacias de detenção na bacia do Lago Paranoá em Brasília/DF. Os resultados apontam a capacidade de redução da vazão de pico entre 10% e 30% e que em casos combinados de implementação de

mais de uma bacia de retenção esta redução atingiu valores entre 30% e 60%. Porém não descartam a possibilidade de que técnicas alternativas que promovam a infiltração das águas pluviais devem ser consideradas para compensação em virtude da impermeabilização das áreas pelos processos de urbanização.

Mujiburrehman (2018), avaliou os efeitos da implementação de uma bacia de retenção através do SWMM, na bacia do Rio Mahiminside Mithi na Índia a qual teve um processo de urbanização acelerado e desordenado. Foi observada uma redução significativa da vazão de pico em torno de 52% e um aumento no tempo de ocorrência em cerca de 180 minutos, demonstrando assim a efetividade da implementação da técnica centralizada no controle de pico de cheias ao serem instaladas em locais críticos para ocorrência de enchentes.

Ronquim *et al.* (2015) estudaram o potencial em mitigar os eventos de inundações na bacia do Rio Lajeado em Palmas/PR, a qual apresenta um histórico de problemas causados por inundações, através de simulações com bacias de retenção alocadas à montante das áreas críticas de alagamento utilizando o SWMM, e observaram que a técnica centralizada foi eficiente em eliminar os pontos de alagamento e sobrecargas no nós e condutos do sistema de drenagem e também na atenuação do pico de cheia no exutório da bacia.

Muito tem-se discutido a respeito de qual a melhor forma de controle para regiões densamente ocupadas. Buscando identificar a eficiência destes conjuntos de técnicas compensatórias, Bai *et al.* (2019), por exemplo, investigaram no distrito de Sucheng na China os impactos de técnicas compensatórias baseadas em infiltração e armazenamento e compararam com cenários sem a implementação de técnicas e com combinação de ambas as formas de controle para diferentes padrões de precipitação. Observaram que as técnicas baseadas nos processos de infiltração foram mais eficientes na redução do escoamento superficial e que a combinação das técnicas apresentou os melhores resultados na redução da vazão de pico (32,5%) e volume total escoado (31,8%). Apontam ainda que por se tratarem de técnicas baseadas em processos distintos, seus efeitos são diferentes e desta forma, a depender da situação, podem apresentar-se eficientes ou não em certas ocasiões. Concluem que uma combinação de ambas os tipos de técnicas seria a forma mais eficiente de reduzir o escoamento superficial e que a utilização de técnicas compensatórias pode atuar na prevenção de desastres causados por eventos de precipitação extremos.

Oliveira *et al.* (2017) avaliaram o sistema de drenagem existente e os impactos da implementação de técnicas de controle na fonte e bacias de retenção na bacia hidrográfica do Lago Paranoá em Brasília/DF. Através de um modelo calibrado foram desenvolvidos três cenários, sendo um deles apenas com as técnicas LID, um segundo apenas com a bacia de

detenção e o terceiro um conjunto de ambos os cenários. Foi utilizada uma chuva de projeto construída através do método dos blocos alternados e de acordo com o Plano Diretor de Drenagem Urbana da cidade, a qual determinar um período de retorno de 10 anos. Os resultados demonstram que a adoção de bacias de retenção próximas ao exutório são eficientes no amortecimento das vazões de pico, enquanto as técnicas LID atuaram na diminuição do volume de água acumulado na superfície e conseqüentemente nos pontos de alagamento. Concluem ainda que uma adição conjunta de técnicas no controle da fonte e centralizadas traria a contribuição de ambos os tipos de técnicas e impactaria numa redução de escoamento de águas pluviais em cerca de três vezes quando comparado com o cenário atual.

### **3 SIMULAÇÃO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS PARA CONTROLE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL URBANO: CONTROLE NA FONTE OU CENTRALIZADO?**

O artigo intitulado “Simulação de Técnicas Compensatórias para Controle do escoamento Superficial Urbano: controle na fonte ou centralizado?” foi submetido em 15/07/2022, sob ID 533411-1, à revista Ambiente Construído, classificada como B1 na área de Engenharias I da CAPES, tendo como autores Maurício Marcuz Buffo, Alexandre Silveira e Frederico Carlos Martins de Menezes Filho.

## **Simulation of Best Management Practices for Urban Runoff Control: source or centralized control?: Simulação de Técnicas Compensatórias para Controle do Escoamento Superficial Urbano: controle na fonte ou centralizado?**

*Versão preliminar*

### **RESUMO**

O elevado crescimento populacional nas últimas décadas intensificou o processo de urbanização desenfreada tornando recorrente inundações e alagamentos em áreas urbanas. Através da modelagem hidrológica pode-se analisar o uso de técnicas compensatórias no intuito de controlar os efeitos adversos oriundos do escoamento superficial. O presente artigo objetiva avaliar o impacto no controle de escoamento superficial utilizando técnicas compensatórias alocadas em áreas susceptíveis à geração, transporte e acumulação de fluxo de água da chuva em cenários distintos de ocupação através do modelo hidrológico SWMM. Após a identificação das áreas susceptíveis, estabeleceu-se em função das características individuais o emprego de telhados vegetalizados, plantio de vegetação nativa, microrreservatórios e bacias de detenção. Foi utilizada uma chuva de projeto com período de retorno de 25 anos, de modo a avaliar o impacto no amortecimento do pico de cheia. O controle centralizado mostrou-se mais eficiente com capacidade no controle do pico de cheia através das bacias de detenção com reduções de 77,81 a 97,77% nas vazões de pico em cada um dos cenários avaliados, seguido do controle na fonte por meio dos microrreservatórios com 44,62 a 69,09% e depois pelos telhados vegetalizados com 18,71 a 40,53%.

**Palavras-chave:** Técnicas Compensatórias; Drenagem Urbana; Modelagem Hidrológica; SWMM

### **ABSTRACT**

The high population growth in recent decades has intensified the process of unbridled urbanization making recurrent floods and inundations in urban areas. Through hydrological modeling, it is possible to analyze the use of compensatory techniques in order to control the adverse effects arising from surface runoff. The objective of this work was evaluate the impact on the control of surface runoff using compensatory techniques allocated in areas susceptible to the generation, transport and accumulation of rainwater flow in different scenarios of occupation through the SWMM hydrological model. After identifying the susceptible areas, based on individual characteristics, the use of vegetated roofs, planting of native vegetation, micro-reservoirs and detention basins were established. A design rainfall with a return period of 25 years was used in order to assess the impact on the dampening of the flood peak. The centralized control proved to be more efficient with the ability to control the peak flood through the detention basins with reductions of 77.81 - 97.77% in peak flows in each of the evaluated scenarios, followed by control at the source through from the micro-reservoirs with 44.62 - 69.09% and then by the vegetated roofs with 18.71 - 40.53%.

**Keywords:** Compensatory Techniques; Urban drainage; Hydrological Modeling; SWMM.

## 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento dos processos de urbanização em função do crescimento populacional acentuado nas últimas décadas, ocorreram ocupações desordenadas e em áreas irregulares, causando problemas relacionados ao sistema de drenagem urbana.

A modelagem hidrológica pode ser utilizada para avaliar formas de controlar os efeitos adversos oriundos do escoamento superficial urbano através de técnicas compensatórias e assim regularizar o sistema de drenagem. Desta forma estudos aplicados ao dimensionamento e desempenho das redes de drenagem, no amortecimento de cheias e redução das vazões máximas, são de extrema importância para o controle e/ou prevenção dos impactos das inundações, onde a atuação pode ser através do aumento dos processos de infiltração e/ou armazenamento da água das chuvas (TUCCI, 2005; TUCCI, 2007; COLLODEL, 2009; TOMINAGA, 2013).

Existem diversos modelos hidrológicos que são capazes de realizar simulações visando os aspectos hídricos de um sistema, dentre eles, o modelo SWMM se destaca pela sua maior abrangência e flexibilização nos estudos e precisão na avaliação de processos de transformação chuva-vazão com técnicas compensatórias e proximidade com a realidade (COLLODEL 2009; AHIABLAME et al., 2012).

As técnicas compensatórias atuam nos sistemas de drenagem de forma a regularizar ou elevar a eficiência hidráulica, assim tendo um papel fundamental, principalmente em bacias urbanas já consolidadas, no controle de enchentes e inundações (ECKART et al., 2017; FLETCHER et al., 2015). Partindo desta premissa diversos pesquisadores têm utilizado o modelo SWMM de modo a avaliar os impactos da implementação das técnicas compensatórias em ambientes urbanos.

Visando avaliar o comportamento e a eficiência de técnicas compensatórias na drenagem urbana, Lee et al. (2012) e Josimovic e Alam (2014), realizaram estudos em diferentes bacias avaliando a implementação de combinações de técnicas distintas através do SWMM e obtiveram reduções significativas em eventos de inundação, na vazão de pico de cheia e nos volumes escoados, em detrimento da diminuição do escoamento superficial, concluindo assim que técnicas compensatórias são eficientes no controle e regularização dos sistemas de drenagem urbano.

Técnicas de controle na fonte como microrreservatórios e telhados vegetalizados são indicadas para atenuar os efeitos da precipitação direta em ambientes construídos e reduzir o escoamento superficial em áreas urbanas e densamente ocupadas. Desta forma, buscando identificar o impacto das técnicas com controle na fonte, Carvalho et al. (2017), Ahiablame et al. (2013), Shin et al. (2013) e Leite et al. (2016), simularam, através do SWMM, os impactos da implementação de técnicas de controle na fonte em diferentes bacias, e verificaram uma redução nas vazões máximas, no escoamento superficial e diminuição em locais de alagamento, mostrando-se uma alternativa como forma de controle das águas pluviais.

As técnicas de controle centralizado são indicadas para extensas áreas de drenagem com intuito de mitigar enchentes e inundações através da redução do pico de cheia e/ou armazenamento de água. Buscando avaliar o impacto da implementação deste tipo de técnica, Souza et al. (2019), Mujiburrehman (2018) e Ronquim et al. (2015), avaliaram o impacto da implementação de bacias de retenção em bacias distintas através do SWMM, e observaram reduções nas vazões de pico e também no aumento no tempo de concentração, demonstrando-se eficientes na mitigação dos eventos de inundação e promovendo um melhor balanço hídrico na bacia de estudo, além de evidenciarem que a localização da estrutura é de suma importância para seu desempenho.

Muito se tem discutido a respeito de qual a melhor forma de controle para regiões densamente ocupadas. Buscando identificar a eficiência destes conjuntos de técnicas compensatórias, Oliveira et al. (2017) e Bai et al. (2019), realizaram estudos avaliando o sistema de drenagem e

o comportamento técnicas centralizadas e de controle na fonte, estas baseadas em infiltração e armazenamento, utilizando o SWMM, e observaram que as técnicas de controle na fonte, atuantes nos processos de infiltração, foram eficazes na diminuição do escoamento superficial, promovendo assim diminuição nos pontos de alagamento, enquanto as técnicas centralizadas baseadas em armazenamento demonstraram-se eficientes no amortecimento das vazões de cheia. Concluíram ainda que através da combinação de ambos os tipos de técnicas haveriam os benefícios individuais de cada uma delas, o que seria a forma mais eficiente de reduzir o escoamento superficial e que a utilização de técnicas compensatórias pode atuar na prevenção de desastres causados por eventos de precipitação extremos.

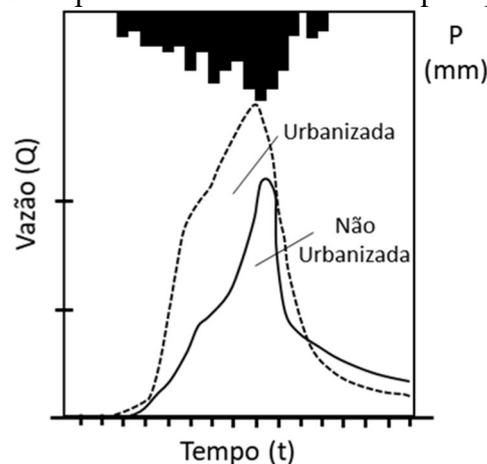
O presente trabalho tem como objetivo comparar a inserção de técnicas compensatórias de controle na fonte em ambientes construídos com o controle centralizado e avaliar sua eficiência no amortecimento das vazões dos hidrogramas, utilizando o SWMM como ferramenta de simulação, em uma sub-bacia urbanizada.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Enchentes e inundações

O elevado crescimento populacional nas últimas décadas propiciou o aumento da impermeabilização e compactação do solo, adensamento de ambientes construídos, canalização de corpos hídricos, entre outros. Estes processos atrelados à ocupação de áreas inadequadas são fatores que corroboram para ocorrência de problemas ligados a gestão das águas urbanas, sendo um de seus maiores impactos as enchentes e inundações. O hidrograma típico de uma bacia natural e aquele resultante da urbanização são apresentados na Figura 1 (TUCCI, 2007).

Figura 1 - Comparação do hidrograma hipotético de uma bacia urbanizada e não urbanizada para um mesmo evento de precipitação.



Fonte: Autor.

As enchentes estão associadas a uma elevação do nível do corpo hídrico, porém limitada dentro de seu leito. Já as inundações correspondem a elevação não usual do nível d'água, a qual provoca o extravasamento do canal e a ocupação da área de várzea (BARBOSA, 2014).

Uma nova abordagem surgiu como alternativa aos sistemas clássicos de gestão de águas urbanas os quais limitavam-se basicamente na captação e condução das águas através de condutos, estes em sua maioria subterrâneos, e eventualmente algumas obras complementares, esta nova abordagem trata do desenvolvimento sustentável com intuito de solucionar e/ou mitigar os efeitos dos processos urbanísticos que impactam direta e indiretamente o ciclo hidrológico (COSTA et al., 2007).

## 2.2 Técnicas compensatórias como controle do escoamento

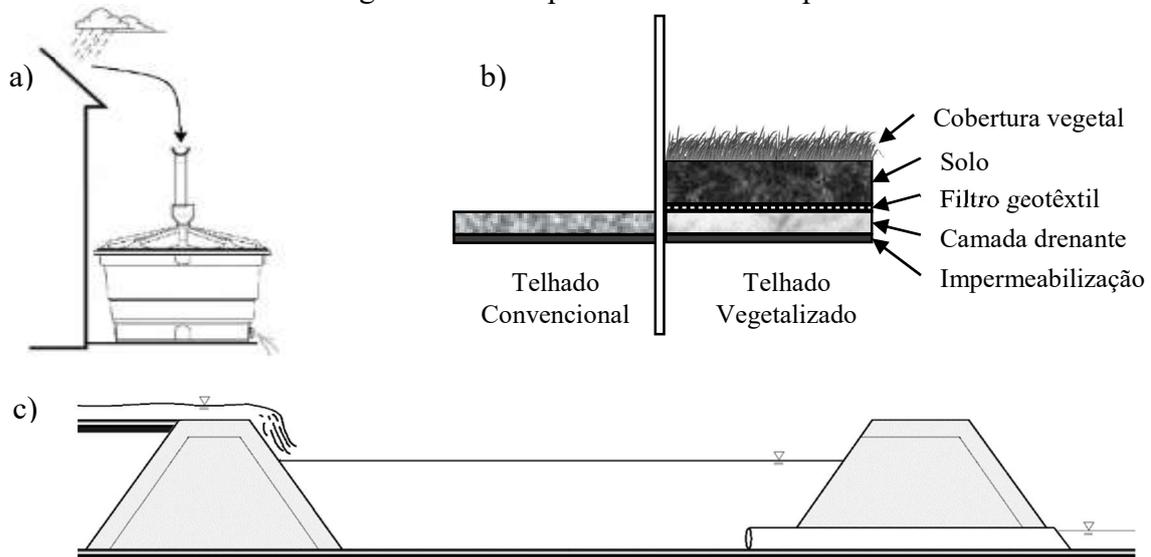
As técnicas compensatórias (TC's), são um segmento do desenvolvimento sustentável, as quais atuam nos sistemas de drenagem de forma a regularizar ou elevar a eficiência hidráulica, assim desenvolvendo um papel no controle de enchentes e inundações urbanas.

Segundo Batista et al. (2005), existem diversos tipos de técnicas compensatórias, porém a ampla maioria é baseada nos processos de infiltração e/ou armazenamento de água, podendo sua atuação ser baseada em escala de lote (controle na fonte) ou em escala de bacia (controle centralizado). A Figura 2 apresenta o esquema de alguma das TCs existentes.

Dentre as técnicas de controle na fonte, destacam-se os microrreservatórios (MR), estes representados por estruturas individuais de armazenamento de água proveniente das precipitações que incidem diretamente nos telhados dos ambientes construídos, podendo haver drenagem ou não. Os reservatórios podem ser superficiais ou enterrados, a depender da disponibilidade física e topográfica do local e a água armazenada neles podem ou não ser reaproveitadas (BALLARD et al., 2015). Outra técnica de controle em escala de lote são os telhados vegetalizados (TV), que atuam na captação de água direta da precipitação a qual infiltra e é armazenada na camada de solo com vegetação (BATISTA et al., 2005). O plantio de vegetação nativa (PVN) é outro exemplo de técnica, que consiste na inserção de vegetação em áreas impermeáveis ou em áreas gramadas. Sua implementação tem por finalidade aumentar a taxa de infiltração no solo, bem como promover uma maior evapotranspiração e interceptação da água de chuva pela copa das árvores (WANG et al., 2017b).

Para as técnicas de controle centralizado, visando atender uma grande área de drenagem, existem as bacias de retenção (BR), que atuam no armazenamento da água em curto período, permitindo desta forma a transferência de vazões compatíveis com o limite tolerado pela rede de drenagem através de dispositivos de descarga em sua estrutura (BATISTA et al., 2005).

Figura 2 – Exemplo de técnicas compensatórias.



Fonte: Autor. Legenda: a) microrreservatórios; b) telhados vegetalizados; c) bacia de retenção.

Cada uma das diferentes TC's possuem restrições relacionadas à sua implantação como: local, disponibilidade de espaço e declividades ideais. Desta forma, é imprescindível que as mesmas sejam alocadas em locais aptos, de modo a obter um bom desempenho. Segundo Rodrigues (2020), a instalação de TC's deve ser feita após a identificação de áreas críticas, que são áreas susceptíveis à geração, transporte e acumulação de escoamento superficial. A forma de determinação baseia-se em fatores topográficos e do solo (área de drenagem, perímetro,

declividade, condutividade hidráulica e capacidade de armazenamento do solo) e nas características individuais de cada uma das técnicas.

Como forma de avaliar a implementação das TC's pode-se utilizar um modelo hidrológico que tem como função a representação dos processos naturais, como a transformação chuva-vazão. O SWMM - *Storm Water Management Model* é um modelo capaz de simular o escoamento superficial em ambientes urbanos, o que permite avaliar o impacto das TC's no sistema de drenagem.

### 2.3 Hidrologia urbana

Na hidrologia urbana temos como uma das bases os eventos de precipitação, que são quaisquer tipos de umidade depositadas na superfície terrestre, sendo no Brasil, sua maior ocorrência na forma de chuva (ALMEIDA et al., 2017). Segundo Tucci (2004), a precipitação pode ser caracterizada através de grandezas distintas: altura (o volume de chuva precipitado), duração (intervalo de tempo), intensidade (variabilidade temporal) e frequência (probabilidade de ocorrência). A representação dos eventos de precipitação é realizada através de hietogramas, que são formas gráficas as quais mostram intensidade da chuva ao longo de sua duração.

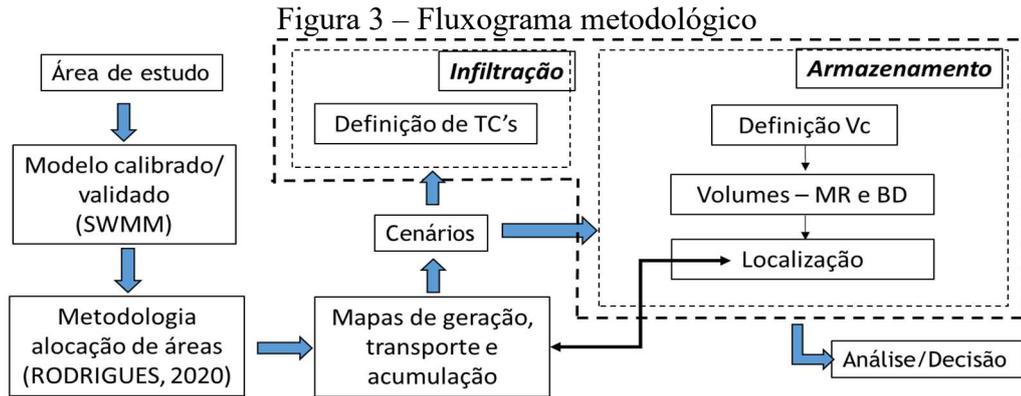
Em sua grande maioria, eventos de precipitação geram escoamento superficial como parcela de chuva a qual não infiltrou, e correspondem ao fluxo da água na superfície do solo (RIGHETTO, 1998). O tempo de percurso da água desde o ponto mais afastado da bacia até dado local de interesse, a partir do instante de início da precipitação, é denominado tempo de concentração. De acordo com Tucci (2004), o escoamento superficial gerado pode ser expresso ao longo do tempo, sendo representado por um elemento gráfico denominado hidrograma.

Para os projetos relacionados à drenagem urbana é necessário que seja definida uma chuva de projeto, as quais são metodologias de representação simplificada de distribuição temporal da precipitação, e que implicará diretamente na quantidade de água precipitada e conseqüentemente no volume de água escoado (TUCCI, 2005).

No planejamento urbano, como forma de controlar o escoamento superficial pode ser empregado o conceito de vazão específica de pré-desenvolvimento, a qual corresponde às condições mais próximas da situação natural existente na área de drenagem, onde em princípio, a mesma deve ser mantida após a urbanização da área. Consoante a isto, existe um volume específico empregado para o dimensionamento de estruturas hidráulicas para garantir que esta vazão seja atendida, e o mesmo é denominado volume de reservação (PORTO ALEGRE, 2005).

## 3 MÉTODO

A metodologia empregada neste trabalho segue o fluxograma apresentado na Figura 3. Após a definição da área de estudo, empregou-se o modelo calibrado e validado por Cavalcanti (2020). Para a definição da alocação de áreas prioritárias para as técnicas compensatórias, utilizou-se a metodologia desenvolvida por Rodrigues (2020). Estabeleceram-se cenários distintos de uso e ocupação e foram definidas estruturas de controle na fonte, a saber: telhados vegetalizados, microrreservatórios e plantio de vegetação nativa e para controle centralizado bacias de detenção. Para as estruturas de armazenamento, primeiro definiu-se o volume de controle relativo a vazão de pré-desenvolvimento para bacia hidrográfica e depois os volumes em função de equações de pré-planejamento para estes dispositivos. A definição da localização se pautou na etapa já realizada de alocação de áreas em função dos mapas de geração, transporte e acumulação. Ao final das simulações para os cenários pré-estabelecidos avalia-se a melhor decisão ou escolha sobre os tipos de controle na fonte ou centralizado na bacia hidrografia em estudo.

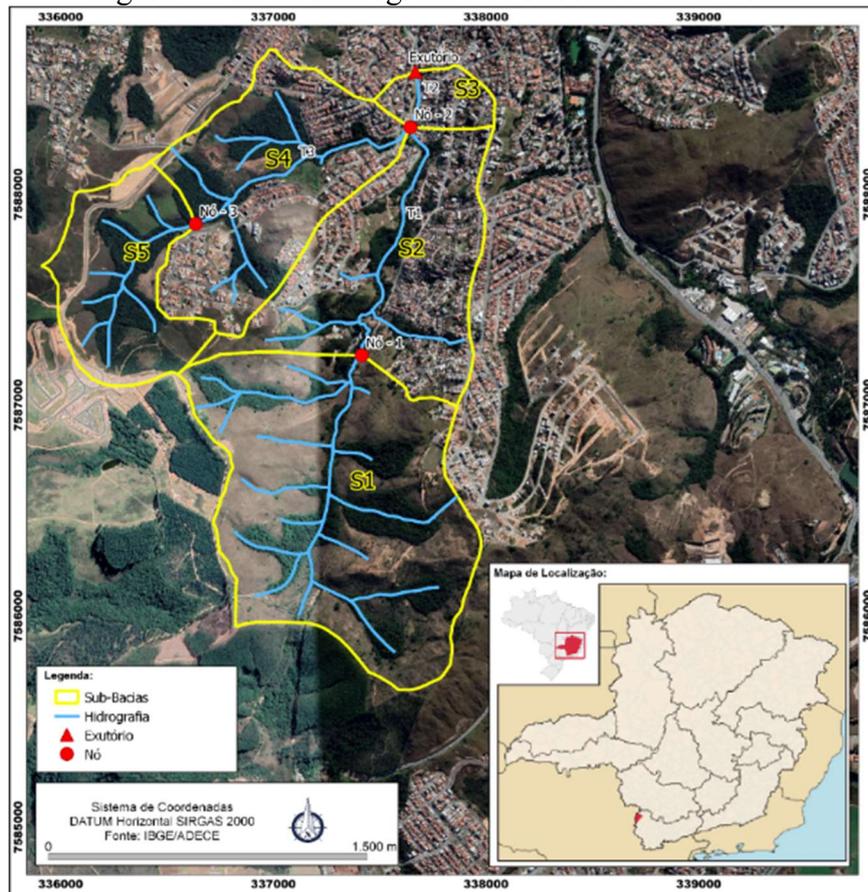


Fonte: Autor. Legenda: Vc: Volume de controle; MR: Microrreservatórios; BD: Bacias de detenção;

### 3.1 Área de Estudo

O presente estudo foi realizado na bacia hidrográfica do Ribeirão Vai e Volta localizada no município de Poços de Caldas – MG. Caracteriza-se por uma bacia hidrográfica urbana densamente ocupada com histórico de enchentes e inundações.

Figura 4 – Bacia Hidrográfica do Ribeirão Vai e Volta.



Fonte: Autor. Legenda: S: Sub-bacia; T: Trecho.

Na Tabela 1, estão apresentados os dados da bacia hidrográfica de estudo obtidos por Cavalcanti (2020).

Tabela 1 - Características físicas da bacia hidrográfica do Ribeirão Vai e Volta.

Parâmetro	Valores
Área de drenagem (A)	3,96 km <sup>2</sup>
Perímetro	9,43 km
Declividade média da sub-bacia (Ss)	10,60%
Comprimento do curso d'água principal (Lp)	3,92 km
Declividade média do curso d'água principal (Sp)	2,94 %
Extensão média do escoamento superficial (Cm)	0,06 km
Índice de conformação (Ic)	0,4
Coefficiente de compacidade (Kc)	1,33
Fator de forma (Kf)	0,48
Densidade de drenagem (Dd)	3,87 km.km <sup>-2</sup>
Tempo de concentração - Kirpich (Tc)	33,26 min
Elevação máxima da sub-bacia (EI.máx)	1.468 m
Elevação mínima da sub-bacia (EI.mín)	1.224 m

Fonte: Cavalcanti (2020).

### 3.2 Utilização do SWMM

Para simulação das técnicas compensatórias foi utilizado o software SWMM e as diferentes técnicas compensatórias existentes, foram, com as mais diversas combinações possíveis, escolhidas algumas configurações de ocupação de área na bacia.

O monitoramento hidrológico da área de interesse foi realizado através de uma estação fluvio-pluviométrica instalada na margem esquerda do exutório da bacia hidrográfica, nas coordenadas UTM 7.588.585,30 S 337.678,20 E, entre os períodos de setembro de 2017 a outubro de 2018.

Cavalcanti (2020), discretizou a sub-bacia hidrográfica em 5 sub-bacias homogêneas conectadas à 3 trechos de propagação do escoamento superficial (Figura 4), onde através de levantamentos realizados em campo e de técnicas de geoprocessamento determinou os parâmetros de entrada para cada uma das sub-bacias, estes essenciais para o desenvolvimento de simulações dentro do SWMM.

Para calibração do modelo, seus parâmetros foram ajustados manualmente, de modo que comparando os hidrogramas simulados e experimentais através do Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE) fosse determinado o melhor ajuste. Já a validação do modelo deu-se através dos resultados de NSE gerados pelo confronto dos dados simulados com os observados em determinados eventos de precipitação (CAVALCANTI, 2020).

### 3.3 Alocação das técnicas compensatórias

Cada uma das diferentes TC's apresenta restrições relacionadas à sua aplicação como: local, disponibilidade de espaço e declividades ideais distintas. Desta forma, fez-se necessário, inicialmente, determinar a alocação de cada uma delas. Para tal, dispôs-se da metodologia aplicada por Rodrigues (2020), que pautou-se na determinação de áreas críticas para inserção das estruturas através da identificação das áreas susceptíveis à geração, transporte e acumulação de escoamento superficial. O método baseia-se em fatores topográficos e do solo (área de drenagem, perímetro, declividade, condutividade hidráulica e capacidade de armazenamento do solo) e nas características individuais de cada uma das técnicas.

De modo a aplicar a metodologia proposta, fez-se necessário o desenvolvimento de um banco de dados com informações levantadas através de bibliografias e cartas topográficas existentes sobre a área de estudo, sendo consultados Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); Prefeitura Municipal de Poços de Caldas (PMPC); Estudo de Caracterização Geológico-

Geotécnica aplicado ao planejamento rural e urbano do Município de Poços de Caldas, MG (Desenvolvido pela Universidade Estadual Paulista (Unesp), Campus de Rio Claro-SP); Base de dados de desastres naturais no município de Poços de Caldas-MG (Sardinha et al., 2016). Desta forma foram obtidos os dados referentes aos cursos d'água, curvas de nível, cotas topográficas, geologia local, imagens aéreas e o histórico de eventos de desastres naturais, e através da álgebra de mapas realizada no software QGIS, foi possível extrair todas as informações necessárias.

Para elaboração dos mapas de susceptibilidade ao escoamento superficial foram utilizados os seguintes indicadores e pesos, apresentados na Tabela 2, conforme método citado.

Tabela 2 - Indicadores e pesos utilizados na determinação das áreas susceptíveis

(continua)

Mapa	Indicador	Critério	Peso
Geração	Declividade e capacidade de saturação do solo	Capacidade de saturação da área e geração de escoamento superficial	Declividade < t1 - 0 Declividade > t1 - 1
	Permeabilidade	Capacidade do tipo de solo em infiltrar a água, conforme grupos de solo definidos pelo SCS-USDA	A e B - 0 C e D - 1
	Profundidade	Capacidade de armazenamento de água no perfil de solo	Profundos e estruturados - 0 Rasos e podzólicos - 1
	Uso do solo	Considera as áreas permeáveis e impermeáveis	Áreas permeáveis - 0 Áreas impermeáveis - 1
Transporte	Geração	Interação das áreas geradoras de escoamento superficial na transferência para outras áreas	Baixas susceptibilidade - 0 Alta susceptibilidade - 1
	Declividade	Declividade interfere na capacidade de transporte do escoamento superficial	Plano e suave ondulado (0-8%) - 0 Ondulado (8-20%) - 0,5 Forte-ondulado, montanhoso e forte montanhoso (>20%) - 1
	Concavidade	Concavidade do terreno influencia no transporte do escoamento superficial	Côncavo e Divergente - 0 Côncavo e Convergente - 0,5 Convexo e Divergente - 0,5 Convexo e Convergente - 1
	Uso do solo	Impacto das áreas permeáveis e impermeáveis	Áreas permeáveis - 1 Áreas impermeáveis - 0
	Ruas	Impacto do transporte do escoamento superficial pelas vias	Fora das ruas - 0 Ruas - 1

Tabela 2 - Indicadores e pesos utilizados na determinação das áreas susceptíveis (conclusão)

Acumulação	Geração	Interação das áreas geradoras de escoamento superficial na transferência para outras áreas	Baixas susceptibilidade - 0 Alta susceptibilidade - 1
	Declividade	Declividade interfere na capacidade de transporte do escoamento superficial	Forte-ondulado, montanhoso e forte montanhoso (>20%) - 0 Ondulado (8-20%) - 0,5 Plano e suave ondulado (0-8%) - 1
	Concavidade	Concavidade do terreno influencia no transporte do escoamento superficial	Convexo e Divergente - 0 Convexo e Convergente - 0,5 Côncavo e Divergente - 0,5 Côncavo e Convergente - 1
	Uso do solo	Impacto das áreas permeáveis e impermeáveis	Áreas permeáveis - 0 Áreas impermeáveis - 1
	Área de contribuição	Impacto da área de contribuição na acumulação do escoamento superficial	Baixo (<0,5ha) - 1 Alto (≥0,5ha) - 1

Fonte: Rodrigues (2020), adaptado.

A escolha das técnicas compensatórias deu-se com foco no amortecimento de cheia dos hidrogramas gerados por eventos de precipitação na sub-bacia hidrográfica, bem como sua ampla aplicabilidade em cenários semelhantes ao estudado, sendo elas: plantio de vegetação nativa e telhados vegetalizados (BAI et al., 2019; ROSA et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2017; MARTIN-MIKLE et al., 2015).

Na Tabela 3 está apresentada a relação das áreas prioritárias para alocação das técnicas compensatórias com as características particulares de cada uma.

Tabela 3 - Características das técnicas compensatórias.

Técnica	Declividade (%)	Classe de Uso	Local	Área Prioritária
Telhados Vegetalizados	-	Impermeável	-	Geração
Plantio de Vegetação Nativa	> 20	Permeável	-	Geração Transporte Acumulação

Fonte: Rodrigues (2020), adaptado.

A metodologia de alocação das técnicas compensatórias baseia-se em técnicas que atuam no processo de infiltração. Além das técnicas compensatórias citadas anteriormente, avaliou-se também a implementação do controle na fonte por meio de microrreservatórios e do controle centralizado por meio das bacias de detenção, as quais são técnicas pautadas no processo de armazenamento (BAPTISTA, 2005).

### 3.4 Cenários simulados

Para as diferentes técnicas compensatórias avaliadas neste estudo, estabeleceram-se cenários distintos, os quais apresentavam variações nas quantidades de áreas destinadas à instalação das TC's nas sub-bacias, ou seja, fez-se a ocupação com percentual de 50% e 100% nas áreas classificadas como indicadas para sua instalação obtidas através da metodologia de alocação e para as técnicas de armazenamento (microrreservatórios e bacias de detenção) optou-se por utilizar uma unidade de microrreservatórios por lote, e a inserção de uma bacia de detenção por sub-bacia. Para as técnicas de armazenamento avaliou-se configurações com e sem drenagem, de modo a comparar seu comportamento e eficiência.

Na Tabela 4 apresentam-se as informações de cenários para as técnicas de telhados vegetalizados e plantio de vegetação nativa, as quais são representadas por unidade de área.

Tabela 4 - Cenários simulados para Telhados Vegetalizados e Plantio de Vegetação Nativa.

<b>CENÁRIO 01: TC Sub-bacia - 100%</b>					
Sub-bacia	Telhados Vegetalizados			Plantio de Vegetação Nativa	
	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	% Impermeável	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
S1	0,0079	0,52%	0,95%	0,7560	49,47%
S2	0,3851	42,26%	48,31%	0,1875	20,57%
S3	0,0914	72,04%	81,20%	0,0000	00,00%
S4	0,2807	32,44%	38,08%	0,2364	27,32%
S5	0,0038	0,74%	0,47%	0,2894	55,75%
<b>CENÁRIO 02: TC Sub-bacia - 50%</b>					
Sub-bacia	Telhados Vegetalizados			Plantio de Vegetação Nativa	
	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	% Impermeável	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
S1	0,0040	0,26%	0,9476%	0,3780	24,73%
S2	0,1925	21,13%	56,0726%	0,0937	21,13%
S3	0,0457	36,02%	90,8116%	0,0000	00,00%
S4	0,1404	16,22%	43,2648%	0,1182	16,22%
S5	0,0019	0,37%	0,4683%	0,1447	0,37%

Fonte: Autor.

Para a simulação das técnicas compensatórias são necessários definir os parâmetros de entrada em virtude dos seus valores individuais para cada uma das TC's escolhidas. Tais parâmetros foram definidos através das recomendações presentes no Volume III (*Water Quality*) do manual de referência do SWMM (ROSSMAN; HUBER; EPA, 2016), e derivadas de Rodrigues (2020); Hamouz e Muthanna (2019). Diferentemente destas estruturas, a técnica de plantio de vegetação nativa deve ser simulada através da alteração dos valores de CN (método Número de Curva do *Soil Conservation Service* – SCS, 1972) e da profundidade de armazenamento em solo das áreas permeáveis ( $D_{store-Perv}$ ).

Previamente à realização das simulações com inserção das técnicas compensatórias realizou-se a simulação da situação atual da área de estudo, de modo a possibilitar uma análise a respeito do efeito da implementação das técnicas.

### 3.5 Estabelecimento da chuva de projeto, volume de controle e estruturas hidráulicas para as simulações

Para desenvolvimento das simulações com a implantação das técnicas compensatórias, faz-se necessário definir e desenvolver algumas relações, além de estimar valores de projeto.

A chuva de projeto a ser utilizada nas simulações pode ser baseada na equação IDF, Equação 1, com seus parâmetros ajustados para Poços de Caldas através do software PLUVIO. O hietograma de projeto para a bacia de estudo foi obtido através do método dos blocos alternados (RECESA, 2007). Para o período de retorno (T) adotou-se o valor de referência de 25 anos conforme algumas literaturas propõem (TOMAZ, 2002; CANHOLI, 2005).

$$i = \frac{1012,538.T^{0,2}}{(t+10,374)^{0,797}} \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo  $i$  a intensidade pluviométrica (mm/h); T o período de retorno (anos); e t o tempo de duração (min).

A vazão de pré-desenvolvimento ou vazão específica ( $q_n$ ), segundo Tucci (2000), pode ser calculada com base no Método Racional através da Equação 2.

$$q_n = 2,78.C.i \quad \text{Eq. 2}$$

sendo,  $i$  é a intensidade pluviométrica (mm/h), esta obtida através das equações IDF para um período de retorno de 10 anos e C é o coeficiente de escoamento, o qual pode ser o obtido pela Equação 3.

$$C = C_p + (C_i - C_p).A_i \quad \text{Eq. 3}$$

onde,  $C_p$  é o coeficiente de áreas permeáveis;  $C_i$  o coeficiente de áreas impermeáveis; e  $A_i$  o índice de impermeabilização (de 0 a 1).

Segundo Tucci (2007), o volume de reservação necessário por unidade de área (volume específico) para atender às características de pré-desenvolvimento, é dado pela Equação 4.

$$V_s = 0,06(2,78.C.i - q_n)t.60 \quad \text{Eq. 4}$$

Segundo Braga e Menezes (2018), correlacionando as Equações 2 e 4, e utilizando de processo iterativo (TUCCI, 2007), é possível determinar a duração para obtenção do volume máximo em função da área impermeável. O volume máximo é obtido para cada valor de  $A_i$ , resultando numa função  $F_i(A_i)$ . Variando o valor de  $A_i$  entre 5% e 100% é possível ajustar uma reta com início na origem, obtendo-se a Equação 5.

$$V_s = a.A_i \quad \text{Eq. 5}$$

onde,  $V_s$  é volume do reservatório de armazenamento ( $m^3/ha$ );  $a$  é o coeficiente da reta que nasce na origem; e  $A_i$  é a área impermeável (%).

Além do método citado anteriormente, existem outros métodos utilizados em fase de pré-planejamento para estimar os volumes de estruturas de armazenamento, que se baseiam nas vazões e volumes de pré e pós-desenvolvimento (Tabela 5).

Tabela 5 – Métodos para determinação do volume de detenção

	<b>Método</b>	<b>Equação</b>
M1	Método do volume de reservação de Tucci (2016)	$V_s = a \cdot Ai$
M2	Relação Simplificada de Urbonas e Glidden (1982)	$V_s = 304,8 \cdot A(0,95I - 190)$
M3	Método de Baker (1979)	$\frac{V_s}{V_a} = 1 - \alpha$
M4	Método de Abt e Grigg (1978)	$\frac{V_s}{V_a} = (1 - \alpha)^2$
M5	Método de Wycoff e Singh (1976)	$\frac{V_s}{V_a} = 0,97(1 - \alpha)^{0,753}$
M6	Método de McEnroe, para um único orifício na saída (1992)	$\frac{V_s}{V_a} = 0,98 - 1,17 \cdot \alpha + 0,77 \cdot \alpha^2 - 0,46 \cdot \alpha^3$

\* sendo  $\alpha$  é a razão entre as vazões de pico de pré e pós-desenvolvimento.

Fonte: Autor.

Considerando os volumes de reservação obtidos através do método M1 para cada uma das bacias de detenção dimensionou-as estabelecendo uma estrutura de formato retangular nas proporções de 2x1 e com uma profundidade de armazenamento de 2m.

De posse da Equação 5 definida para obtenção do volume de reservação em Poços de Caldas-MG, estabeleceu-se para um lote padrão de 250 m<sup>2</sup> e para as sub-bacias compondo a área de estudo, o dimensionamento dos microrreservatórios e bacias de detenção.

Como estrutura de saída, considerou-se um extravasador do tipo orifício instalado ao fundo da estrutura, de modo que este descarregasse uma vazão correspondente ao no máximo a vazão obtida de pré-desenvolvimento. Segundo Canholi (2005), a vazão de saída no orifício pode ser obtida através Equação 6.

$$Q = k_o \cdot A_o \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad \text{Eq. 6}$$

sendo Q a vazão de descarga (m<sup>3</sup>/s);  $k_o$  o coeficiente de descarga;  $A_o$  a área de abertura do orifício (m); g a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>); h a altura do nível d'água acima do orifício (m).

Para dimensionamento do vertedor existente nas bacias de detenção utilizou-se da equação do Método Racional para encontrar a vazão de descarga, e sua largura ( $L_v$ ), em metros, foi determinada através da Equação 7 para vertedores de parede espessa conforme o Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre (2005).

$$L_v = \frac{Q_v}{C_v \cdot 1,704 \cdot (h_{m\acute{a}x})^{1,5}} \quad \text{Eq. 7}$$

Consoante o manual do SWMM (ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015), para estruturas de armazenamento utilizam-se os parâmetros coeficiente de drenagem (C) e expoente de drenagem

(n). A estimativa de C pode ser baseada no tempo necessário para drenar completamente uma estrutura com profundidade de água armazenada (D). Desta forma, obtém-se o coeficiente de drenagem de cada uma destas técnicas a serem implementadas da Equação 8.

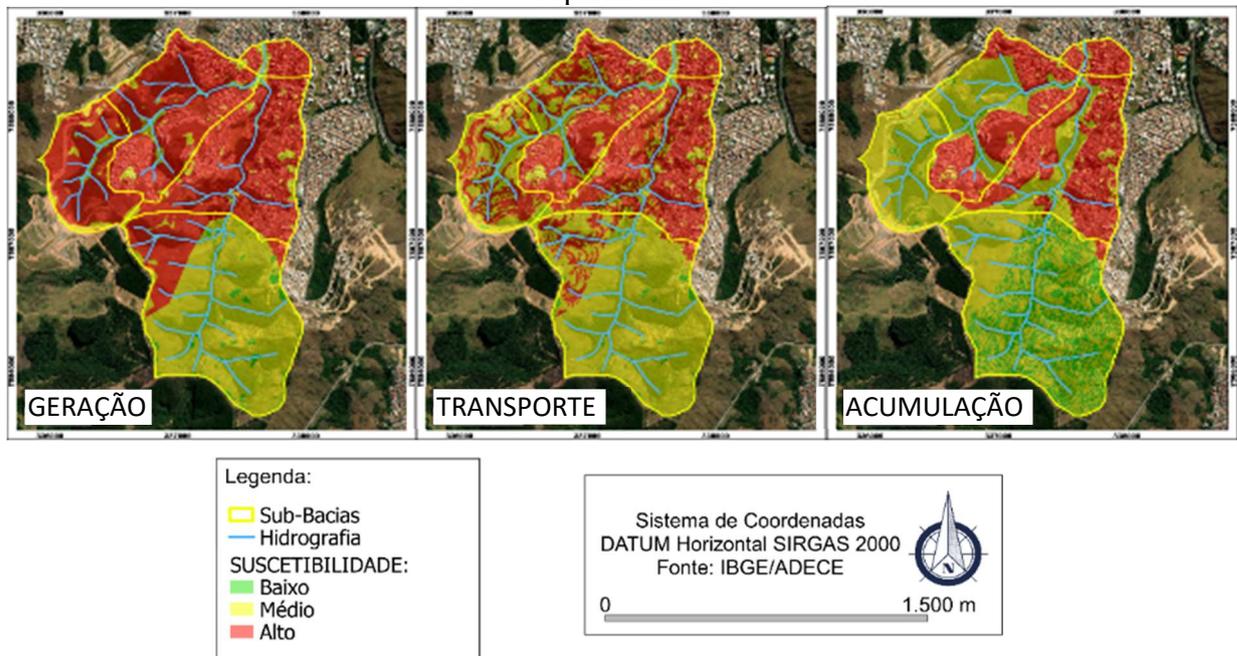
$$C = \frac{2.D^{1/2}}{T} \quad \text{Eq. 8}$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Técnicas compensatórias

Para aplicação da metodologia de alocação das técnicas compensatórias foram gerados três mapas referentes as áreas susceptíveis à geração, transporte e acumulação de escoamento superficial Figura 5.

Figura 5 – Mapas de susceptibilidade a geração, transporte e acumulação de escoamento superficial.



Fonte: Autor.

Através destes mapas e considerando as características de cada uma das TC's foram determinadas as regiões indicadas para instalação das diferentes técnicas compensatórias avaliadas. A seguir a Figura 6 apresenta as alocações destas técnicas.

Figura 6 – Alocação das Técnicas Compensatórias na sub-bacia de estudo.



Fonte: Autor.

Analisando os mapas de alocação gerados, observou-se áreas indicadas para instalação das TC's, onde o plantio de vegetação nativa ficou restrito às áreas impermeáveis e em regiões de cabeceira (parte mais alta da bacia), enquanto os telhados vegetalizados foram indicados para ocupação das áreas edificadas em sua totalidade, correspondente às áreas mais baixas e próximas do exutório. Os valores de área para cada uma das técnicas compensatórias avaliadas bem como sua parcela para cada sub-bacia estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Áreas destinadas para instalação das técnicas compensatórias.

<b>Técnica Compensatória</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
Telhados Vegetalizados	0,7690	19,46%
Plantio de Vegetação Nativa	1,4687	37,18%
<b>TOTAL</b>	<b>2,2377</b>	<b>56,64%</b>

Fonte: Autor.

Além das técnicas apresentadas, optou-se por outras baseadas em armazenamento, podendo ser implementadas em escala de lote, no caso dos microrreservatórios e nas áreas de uso institucional no caso das bacias de detenção. O emprego de tais técnicas justifica-se pela grande quantidade de áreas susceptíveis à geração e transporte do escoamento superficial, com parcela superior a 50% da área total, o que associado à susceptibilidade de acúmulo nas porções mais baixas da sub-bacia tornam-se características ideais para instalação das bacias de detenção, enquanto para os microrreservatórios, os quais são técnicas de atuação na fonte, a alta capacidade de geração implica em áreas propícias de alocação dos mesmos.

#### 4.2 Dimensão das estruturas

Para a vazão de pré-desenvolvimento ( $q_n$ ) e volume de reservação ( $V_s$ ), estes foram calculados através do método de volume de reservação baseado no método racional e os valores encontrados para ambos foram de  $q_n = 22,5 \text{ L/s.ha}$  e  $V_s = 4,53.A_i \text{ m}^3/\text{ha}$  para a sub-bacia de estudo na região de Poços de Caldas.

Aplicando para as estruturas de armazenamento (microrreservatórios e bacias de detenção), temos os seguintes valores:

No caso dos microrreservatórios, estes considerados como controle na fonte, e dimensionados para atender em escala de lote, obteve-se  $q_n = 0,56 \text{ L/s}$ , ou  $5,63.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  e  $V_s = 7,93 \text{ m}^3$ .

Para as bacias de detenção, consideradas no controle da macrodrenagem, e dimensionadas para atender em escala de sub-bacia, a Tabela 7 apresenta os volumes obtidos pelos métodos de pré-planejamento.

Tabela 7 – Volumes de Reservação para bacias de detenção.

Sub- bacia	$Q_a$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Métodos de Reservação						
		$q_n$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	M1 $V_s$ ( $\text{m}^3$ )	M2 $V_s$ ( $\text{m}^3$ )	M3 $V_s$ ( $\text{m}^3$ )	M4 $V_s$ ( $\text{m}^3$ )	M5 $V_s$ ( $\text{m}^3$ )	M6 $V_s$ ( $\text{m}^3$ )
S1	0,88	3,45	<b>659,01</b>	N/A	N/A	<b>5.864,53</b>	N/A	N/A
S2	15,85	2,06	<b>25.664,18</b>	<b>16.994,56</b>	<b>22.408,27</b>	<b>19.492,64</b>	<b>22.497,42</b>	<b>21.632,97</b>
S3	4,91	0,29	<b>5.420,33</b>	<b>3.630,32</b>	<b>5.338,98</b>	<b>5.027,29</b>	<b>5.256,33</b>	<b>5.183,67</b>
S4	13,87	1,95	<b>18.683,50</b>	<b>12.249,09</b>	<b>16.254,82</b>	<b>13.972,45</b>	<b>16.367,56</b>	<b>15.688,22</b>
S5	0,15	1,17	<b>110,64</b>	N/A	N/A	<b>5.540,48</b>	N/A	N/A

Fonte: Autor. Legenda:  $Q_a$ : vazão de pós-desenvolvimento;  $q_n$ : vazão de pré-desenvolvimento;  $V_s$ : volume de reservação; M1: Método do volume de reservação de Tucci; M2: Relação Simplificada de Urbonas e Glidden; M3: Método de Baker; M4: Método de Abt e Grigg; M5: Método de Wycoff e Singh; M6: Método de McEnroe, para um único orifício na saída.

Pode-se observar que para o método M1 escolhido para realização dos dimensionamentos das estruturas e para as simulações subsequentes, apresenta valores próximos aos dos outros métodos. Em alguns casos ocorreram divergências, estas relacionadas as sub-bacias que apresentam maior volume de escoamento (métodos M2 e M4), ou em alguns casos com o tamanho da área de contribuição de drenagem (método M2).

No caso das sub-bacias S1 e S5, estas apresentaram valores negativos e desta forma não aplicáveis, uma vez que a vazão de escoamento de pré-desenvolvimento é menor que a vazão atual de pós-desenvolvimento. Observa-se através dos já conhecidos mapas de susceptibilidade que tais sub-bacias apresentam taxas mais baixas de favorecimento ao transporte e acúmulo e no caso da sub-bacia S1 de geração também, corroborando assim com os resultados obtidos para o volume de detenção de pré-planejamento. Desta forma optou-se por implantar apenas bacias de detenção nas áreas S2, S3 e S4 de forma a controlar o escoamento e pico de cheia.

O volume de reservação para os microrreservatórios encontrado foi de  $7,93\text{m}^3$ , desta forma, optou-se por utilizar uma estrutura pré-fabricada (caixa d'água) com um volume correspondente ao necessário para reservação em lote individual na área urbanizada. O tamanho comercial das estruturas que mais se aproximam do valor estabelecido é de  $7,50\text{m}^3$ , assim o dimensionamento da drenagem para os microrreservatórios foi realizado com base nas seguintes dimensões  $1,89\text{m}$  de profundidade e uma área de  $4,95\text{m}^2$ .

Deste modo, através da Equação 6, obteve-se  $Q = 1,78$  L/s para  $D = 1''$ , e para um dado volume de  $7,50\text{m}^3$  estimou-se a tempo (t) para seu esvaziamento através da relação da vazão de volume por tempo, sendo o tempo encontrado de 1,17h. Já o coeficiente de drenagem C, considerando uma profundidade de drenagem de 1,89m e 1,17h para seu deflúvio completo foi de  $C = 77,27\text{mm/h}$ .

Para as estruturas de saída das bacias de detenção Tabela 8 apresenta os valores encontrados para as mesmas, juntamente com suas dimensões.

Tabela 8 - Parâmetros das bacias de detenção.

Parâmetros	S2	S3	S4
Volume ( $\text{m}^3$ )	25.664,18	5.420,33	18.683,50
Comprimento (m)	160,20	73,62	136,69
Largura (m)	80,10	36,81	68,34
Profundidade (m)	2,00	2,00	2,00
Área (m)	12.832,09	2.710,16	9.342,75
Diâmetro Orifício (m)	0,80	0,30	0,78
Largura do Vertedor (m)	21,44	14,66	25,49

Fonte: Autor.

#### 4.3 Técnicas de controle na fonte

Os dados referentes a simulação representando a situação atual da área de estudo estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados da simulação para cenário atual (individual).

Cenário	Sub-bacia	Precipitação (mm)	Infiltração (mm)	Escoamento superficial (mm)	Pico de cheia ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Coefficiente de escoamento superficial
Atual	S1	50,57	50,09	0,45	0,88	0,009
	S2	50,57	19,07	28,1	15,85	0,556
	S3	50,57	1,95	44,53	4,91	0,881
	S4	50,57	26,37	21,85	13,87	0,432
	S5	50,57	49,35	0,23	0,15	0,005

Fonte: Autor.

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 9 percebe-se que na sub-bacia de estudo, grande parte do escoamento superficial gerado tem origem nas sub-bacias S2, S3 e S4, dado o alto grau de urbanização destas regiões o que com elevada taxa de impermeabilidade do solo configuram condições ideais para ocorrência do escoamento em superfície. Já as sub-áreas S1 e S5, apresentam reduzida contribuição para ocorrência deste fenômeno. Tal fato se justifica por se tratarem de regiões menos urbanizadas e com maior quantidade de áreas permeáveis. Deste modo, para estas duas sub-bacias não optou-se pela inserção de bacias de detenção, o que já se desenhava quando da identificação de áreas prioritárias para alocação das TC's.

A Tabelas 10 apresenta os valores individuais utilizados para a técnica de telhados vegetalizados.

Tabela 10 - Parâmetros individuais inseridos no SWMM para Telhados Vegetalizados.

PARÂMETROS		UND	Telhados Vegetalizados
Superfície	Profundidade de Armazenamento	mm	150,00
	Cobertura Vegetal	Fração	0,10
	Rugosidade Superficial	nº de Manning	0,10
	Declividade Superficial	%	1,00
Solo	Espessura	mm	150,00
	Porosidade	Fração Volumétrica	0,50
	Capacidade de Campo	Fração Volumétrica	0,30
	Ponto de Murcha	Fração Volumétrica	0,10
	Condutividade Hidráulica	mm/h	700,00
	Declividade da Condutividade	-	10,00
	Potencial Matricial	mm	3,50
Camada Drenante	Altura	mm	75,00
	Índice de Vazios	Vazios/Sólidos	0,50
	Rugosidade	nº de Manning	0,10

\*Valores derivados de (ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015); (RODRIGUES, 2020); (HAMOUZ; MUTHANNA, 2019).

Fonte: Autor.

Para os microrreservatórios, os valores individuais inseridos no SWMM estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros individuais inseridos no SWMM para Microrreservatórios.

PARÂMETROS	UND	Microrreservatórios	Microrreservatórios	
		Sem Drenagem	Com Drenagem	
Armazenamento	Profundidade de Armazenamento	mm	1890,00	1890,00
Drenagem	Coefficiente de Drenagem	-	0,00	77,27
	Expoente de Drenagem	-	0,00	0,50
	Altura do dreno em relação a base	mm	0,00	0,00
	Tempo de espera para abertura do dreno	h	0,00	0,00
Quantidade	S1	und	40	40
	S2	und	1925	1925
	S3	und	457	457
	S4	und	1404	1404
	S5	und	19	19

\*Valores derivados de Equação 8; (FORTLEV, 2022)

Fonte: Autor.

Os valores empregados de CN (Considerando um solo do grupo tipo B e com condição de umidade AMC II),  $D_{store-Perv}$  para cada uma das sub-bacias a serem implantadas a técnica de plantio de vegetação nativa estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros individuais inseridos no SWMM para Plantio de Vegetação Nativa.

PARÂMETROS		UND	S1	S2	S3	S4	S5
CN	Atual	-	70,95	82,54	88,8	79,85	75,33
	Implementação da Técnica	-	67,68	81,80	75,00	78,71	68,18
$D_{store-Perv}$	Atual	mm	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64
	Implementação da Técnica	mm	20,54	16,39	20,71	16,69	20,98

\*Valores derivados de (ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015).

Fonte: Autor.

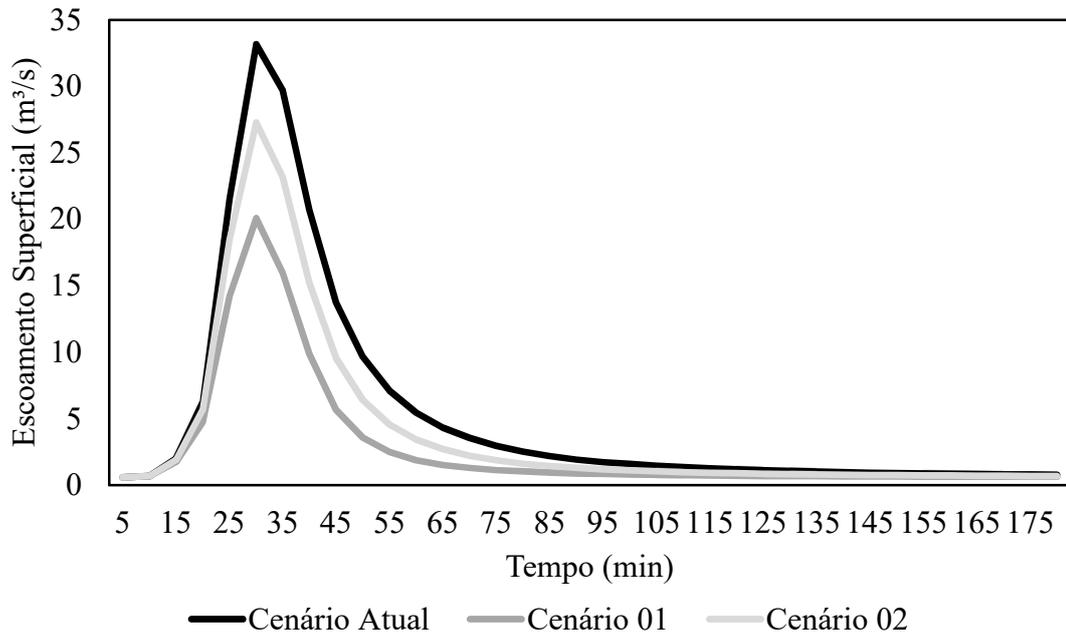
Através das simulações realizadas seguindo os diferentes cenários propostos para os telhados vegetalizados, obteve-se o hidrograma representado pela Figura 7, e de modo a avaliar o impacto de cada um deles no amortecimento das cheias na sub-bacia a Tabela 13, apresenta os dados referentes aos valores gerais das simulações nos cenários 01 e 02.

Tabela 13 – Resultados da simulação para os telhados vegetalizados (geral).

Cenário	Precipitação (mm)	Infiltração (mm)	Escoamento superficial (mm)	Armazenamento (mm)	Pico de cheia (m <sup>3</sup> /s)	Coefficiente de escoamento superficial
Atual	50,57	36,10	12,90	1,57	33,82	0,26
Cenário 01	50,57	33,84	6,16	10,57	20,11	0,12
Cenário 02	50,57	35,09	9,44	6,04	27,49	0,19

Fonte: Autor.

Figura 7 – Hidrograma da sub-bacia – Telhados Vegetalizados.



Fonte: Autor.

Nota-se que há uma grande contribuição por parte da implementação dos telhados vegetalizados no aumento da capacidade de armazenamento da sub-bacia, enquanto ausente apresentam apenas 1,57 mm, e passando para os cenários 01 e 02 temos um aumento para 10,57 mm e 6,04 mm, respectivamente. Isto demonstra a capacidade deste tipo de técnica em armazenar pequenas quantidades do volume precipitado na sub-bacia, o que atrelado a grande área ocupada por elas, resulta neste efeito de armazenamento e contribui para redução no pico de cheia.

Observa-se que houve diminuição na quantidade de água infiltrada, com redução de aproximadamente 6 % para o cenário 01 e 3 % para o cenário 02. Já para os valores de escoamento superficial houve reduções do valor de 12,90 mm na situação atual da sub-bacia para 6,16 mm e 9,14 mm, o que contribuí para diminuição do coeficiente de escoamento superficial na faixa de 52,30 % e 26,93 % para os cenários 01 e 02 respectivamente.

Para as simulações realizadas seguindo os diferentes cenários propostos para o plantio de vegetação nativa, a Tabela 14 apresenta os dados referentes à bacia, possibilitando assim a avaliação do impacto causado pela implementação desta técnica.

Tabela 14 – Resultados da simulação para o plantio de vegetação nativa (geral).

Cenário	Precipitação (mm)	Infiltração (mm)	Escoamento superficial (mm)	Armazenamento (mm)	Pico de cheia (m³/s)	Coefficiente de escoamento superficial
Atual	50,57	36,10	12,90	1,57	33,82	0,255
Cenário 01	50,57	35,78	12,90	1,89	33,82	0,255
Cenário 02	50,57	35,62	12,90	2,05	33,82	0,255

Fonte: Autor.

Analisando ambos os cenários propostos verificou-se que os valores encontrados para a maioria dos parâmetros não resultaram num comportamento esperado, sem redução do escoamento superficial, do coeficiente de escoamento superficial, tão quanto, dos picos de cheia.

Um dos motivos para tal dá-se pelo fato da vegetação atual do local ser classificada como campos de altitude o que atrelado ao solo pertencente ao grupo hidrológico tipo C, implica em uma variação muito pequena na Curva Número do *Soil Conservation Service* – *SCS*, método utilizado para cálculo da infiltração e escoamento das simulações, tendo seus valores alterados de 70 para 71 quando considerando florestas com boa cobertura.

Avaliando o cenário atual das sub-bacias que tiveram maior quantidade de implementação desta técnica, observa-se que estas são áreas compostas por grande parcela de áreas permeáveis e pouco contribuem com o escoamento superficial e considerando que a técnica de plantio de vegetação nativa é possível apenas nas áreas permeáveis justifica o pequeno impacto causado pela sua implementação.

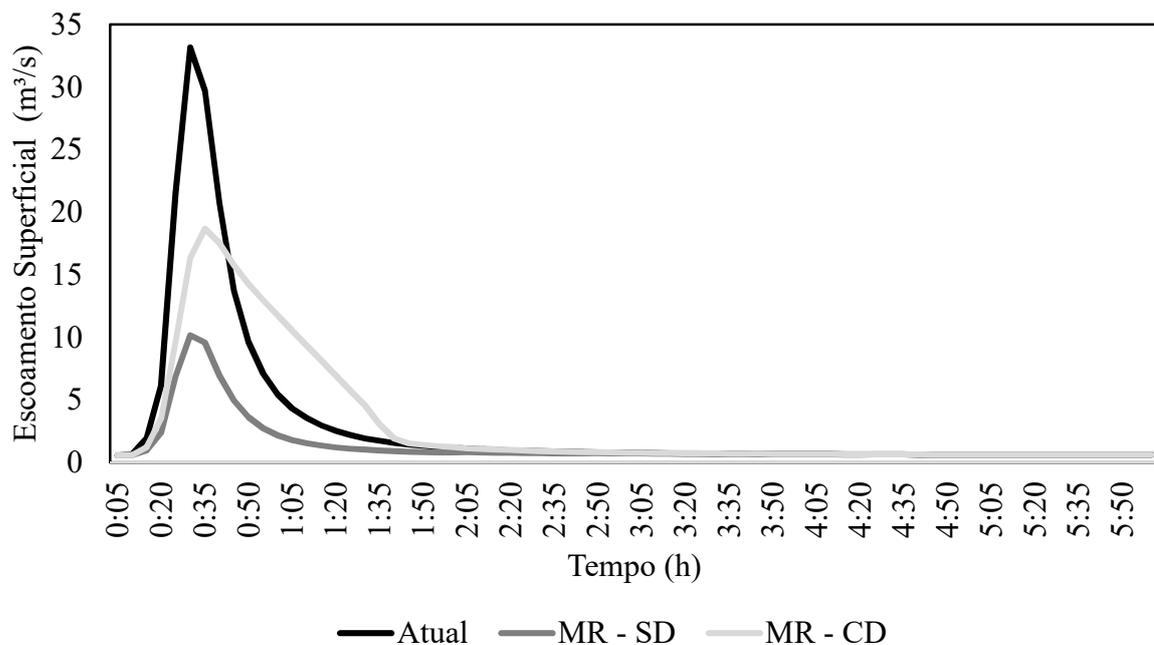
Os dados referentes à bacia para os cenários da aplicação dos microrreservatórios com e sem drenagem, são apresentados na Tabela 15. Os hidrograma relativos à aplicação dos microrreservatórios são ilustrados na Figura 8.

Tabela 15 – Resultados da simulação para microrreservatórios (geral).

Cenário	Precipitação (mm)	Infiltração (mm)	Escoamento superficial (mm)	Armazenamento (mm)	Pico de cheia (m <sup>3</sup> /s)	Coefficiente de escoamento superficial
Atual	50,57	36,10	12,90	1,57	33,82	0,26
MR – SD	50,57	35,98	4,21	10,38	10,45	0,08
MR - CD	50,57	35,98	13,02	1,57	18,73	0,26

Fonte: Autor. Legenda: MR – SD: Microrreservatórios sem drenagem; MR – CD: Microrreservatórios com drenagem.

Figura 8 – Hidrograma da sub-bacia - Microrreservatórios.



Fonte: Autor. Legenda: MR – SD: Microrreservatórios sem drenagem; MR – CD: Microrreservatórios com drenagem.

Pode-se observar que para os microrreservatórios com drenagem não houveram impactos significativos na diminuição do escoamento superficial e no coeficiente de escoamento superficial, enquanto na infiltração ambas as configurações não apresentaram resultados satisfatórios.

Para o pico de cheia houve redução de  $33,82\text{m}^3/\text{s}$  para  $10,45\text{m}^3/\text{s}$  e  $18,73\text{m}^3/\text{s}$ , nas configurações sem e com drenagem, respectivamente. Isto ocorre pelo fato da parcela de água capturada pelas estruturas serem efetivamente sequestradas do processo chuva-vazão, no caso em que não há drenagem e desta forma toda água armazenada na estrutura não segue para o exutório, assim impactando também no escoamento superficial e seu coeficiente. Já nos microrreservatórios com drenagem, esta água é liberada lentamente de modo a reduzir o pico da cheia ao distribuir o volume que escoaria de uma vez ao longo do tempo.

#### 4.4 Técnicas de controle centralizado

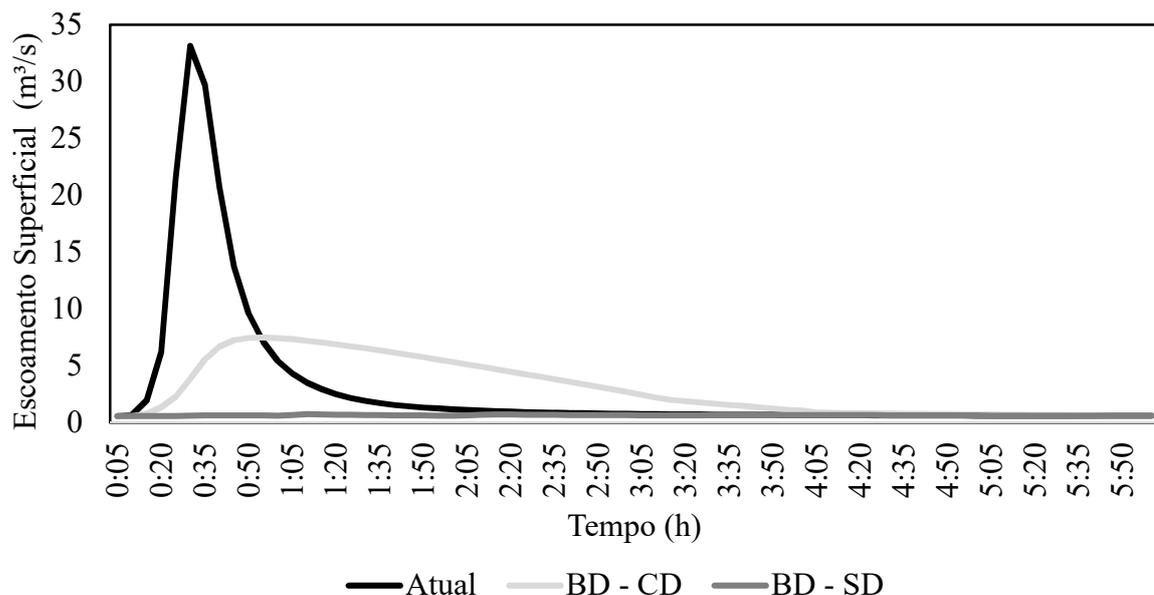
A Tabela 16, apresenta os dados referentes a sub-bacia em geral para as propostas de cenários com e sem drenagem para as bacias de detenção, enquanto seus respectivos hidrogramas estão representados na Figura 9.

Tabela 16 – Resultados da simulação para os cenários avaliados (geral).

Cenário	Precipitação (mm)	Infiltração (mm)	Escoamento superficial (mm)	Armazenamento (mm)	Pico de cheia ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Coefficiente de escoamento superficial
Atual	50,57	36,10	12,90	1,57	33,82	0,26
BD - SD	50,57	35,96	0,50	14,11	0,76	0,01
BD - CD	50,57	35,96	13,06	1,57	7,50	0,26

Fonte: Autor. Legenda: BD – SD: Bacia de detenção sem drenagem; BD – CD: Bacia de detenção com drenagem.

Figura 9 – Hidrograma da sub-bacia – Bacia de Detenção.



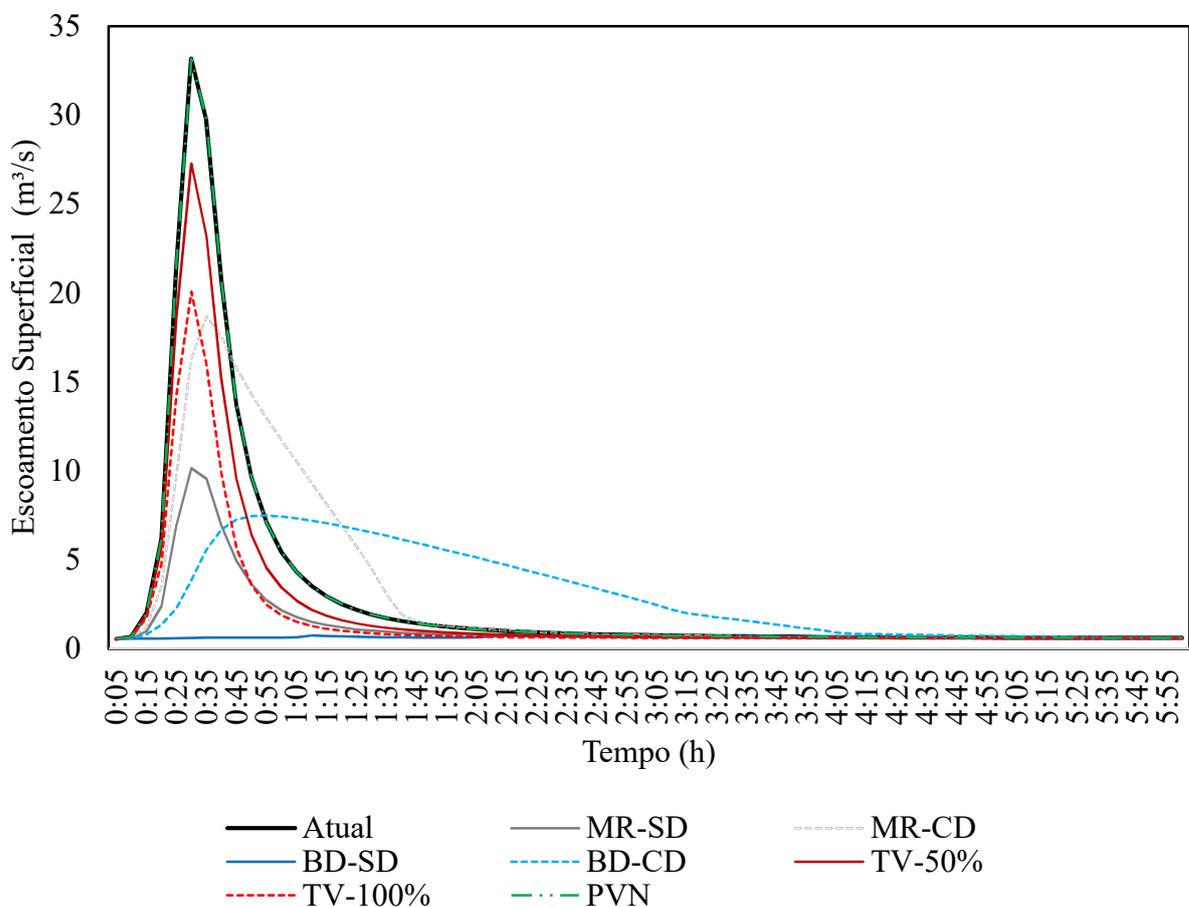
Fonte: Autor. Legenda: BD – SD: Bacia de detenção sem drenagem; BD – CD: Bacia de detenção com drenagem.

Para as bacias de detenção, similarmente aos microrreservatórios, ocorre o mesmo, uma vez que ambas possuem o mesmo comportamento de armazenar uma parcela da água proveniente dos eventos de precipitação, e ser possível sua liberação ou não a depender do caso, assim, observa-se uma redução no pico de cheia de  $33,82\text{m}^3/\text{s}$  para  $0,76\text{m}^3/\text{s}$  e  $7,50\text{m}^3/\text{s}$ , nas configurações sem e com drenagem, respectivamente, demonstrando-se assim a efetiva da técnica no controle de escoamento superficial.

#### 4.5 Comparação das técnicas

Através das simulações realizadas seguindo os diferentes cenários propostos, foram obtidos os hidrogramas (Figura 10), de modo a avaliar o impacto de cada uma das diferentes técnicas compensatórias no amortecimento das vazões de pico nas sub-bacias.

Figura 10 – Hidrogramas da sub-bacia com as técnicas compensatórias.



Fonte: Autor. Legenda: MR – SD: Microrreservatórios sem drenagem; MR – CD: Microrreservatórios com drenagem; BD – SD: Bacia de detenção sem drenagem; BD – CD: Bacia de detenção com drenagem; TV: Telhados vegetalizados; PVN: Plantio de vegetação nativa.

A Tabela 17, apresenta os valores numéricos para as simulações realizadas de modo a permitir uma melhor visualização dos resultados.

Tabela 17 – Resultados das simulações encontrados para cada uma das TC's.

Cenário	Precipitação (mm)	Pico de Cheia (m <sup>3</sup> /s)	Redução no Pico de Cheia
<b>Atual</b>	50,57	33,82	-
<b>MR - SD</b>	50,57	10,45	69,09%
<b>MR - CD</b>	50,57	18,73	44,62%
<b>BD - SD</b>	50,57	0,76	<b>97,77%</b>
<b>BD - CD</b>	50,57	7,50	77,81%
<b>TV - 100%</b>	50,57	20,11	40,53%
<b>TV - 50%</b>	50,57	27,49	18,71%
<b>PVN - 100%</b>	50,57	33,82	0,00%
<b>PVN - 50%</b>	50,57	33,82	0,00%

Fonte: Autor. Legenda: MR – SD: Microrreservatórios sem drenagem; MR – CD: Microrreservatórios com drenagem; BD – SD: Bacia de detenção sem drenagem; BD – CD: Bacia de detenção com drenagem; TV: Telhados vegetalizados; PVN: Plantio de vegetação nativa.

Observa-se que, de modo geral, a implementação das técnicas compensatórias propiciou redução das vazões de pico na bacia em estudo, com exceção da técnica de plantio de vegetação nativa. Tal fato dá-se primeiramente às características fisiográficas da sub-bacia de estudo a qual apresenta parâmetros que dificultam a atuação efetiva do plantio, como o grupo hidrológico do solo e também a declividade. Outro fator é a ocupação do solo da sub-bacia, este com alta taxa de áreas impermeabilizadas o que impossibilita a implantação desta técnica.

Em relação às técnicas de armazenamento (microrreservatórios e bacia de detenção), observa-se que a efetividade das mesmas é superior as demais avaliadas. Isto ocorre, primeiramente, devido a possibilidade de que as mesmas sejam dimensionadas de forma a atender à necessidade do projeto, assim, ao assumir uma vazão máxima de escoamento, e um determinado volume de reservação, tais técnicas conseguem reproduzir fidedignamente suas condições pré-estabelecidas. Já os telhados vegetalizados possuem como fator limitante a reduzida capacidade a ser armazenada, não comportando grandes volume em função do peso.

As bacias de detenção obtiveram os melhores resultados para redução no pico de cheia, sendo aproximadamente 98% para configuração sem drenagem e 78% para configuração com drenagem.

Os microrreservatórios e os telhados vegetalizados, possuem uma atuação semelhante e estão relacionados com controle na fonte, sendo sua implementação limitadas apenas em áreas de ambiente construído, onde sua efetividade está relacionada com a precipitação direta, diferentemente das bacias de detenção, as quais conseguem capturar o volume escoado pelo canal de drenagem que trazem consigo o volume escoado na sub-bacia como um todo.

Apesar do mencionado, os telhados vegetalizados conseguiram uma redução no pico de cheia bem próxima ao obtida pelos microrreservatórios com drenagem, estes considerando a configuração mais usual e de fácil implementação, sendo de aproximadamente 40% e 45%, respectivamente.

## 5 CONCLUSÕES

Através deste estudo observa-se que é possível avaliar os efeitos da implementação de técnicas compensatórias em bacias urbanizadas utilizando o SWMM como ferramenta de simulação.

Em sua maioria, as técnicas compensatórias avaliadas demonstraram-se eficientes no controle do pico de cheia e do escoamento superficial, com exceção do plantio de vegetação nativa, a qual não apresentou redução nos parâmetros avaliados em virtude de suas características individuais e desta forma não sendo indicada para solucionar o problema de cheias na área de estudo.

Destaca-se, para a bacia em pauta, em função das condições atuais de uso e ocupação, a adoção de controle centralizado, através das bacias de retenção com reduções de 77,81% a 97,77% nas vazões de pico em cada um dos cenários avaliados, seguido do controle na fonte por meio dos microrreservatórios com 44,62% a 69,09% e depois pelos telhados vegetalizados com 18,71% a 40,53%.

A escolha do tipo de técnica a ser implantada, conforme apresentado, depende de diversos fatores, principalmente dos fisiográficos, uma vez que todas as técnicas dependem de áreas para sua implementação. Desta forma, a depender da situação atual da área alvo existem limitações de uma ou outra técnica e a escolha dependerá destes fatores.

Não foi possível avaliar os impactos causados pela implementação das técnicas em escala de microdrenagem, uma vez que, por se tratar de uma bacia hidrográfica com dados escassos, seu modelo foi construído com tais limitações de forma simplificada.

Recomenda-se para trabalhos futuros, a avaliação do emprego das técnicas compensatórias associadas ou não sujeitas a chuvas de projeto com distintos períodos de retorno possibilitando uma análise ampla do manejo de águas pluviais para a sub-bacia do Ribeirão Vai e Volta no município de Poços de Caldas-MG.

## REFERÊNCIAS

- AHIABLAME, L.M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement. *Journal of Environmental Management*, v. 119, p. 151-161, 2013.
- AHIABLAME, L.M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. Effectiveness of Low Impact Development Practices: Review and Suggestions for Future Research. *Water Air Soil Pollution*, v. 223, p. 4253-4273, 2012.
- ALMEIDA, G. H. T. D. de; MASINI, L. S.; MALTA, L. R. R. *Hidrologia e drenagem*. Londrina: Educacional S.A., 2017. 200 p.
- BAI, Y.; ZHAO, N.; ZHANG, R.; ZENG, X. Storm water management of Low Impact Development in urban areas based on SWMM. *Water*, v. 11, p. 1-33, 2019.
- BALLARD, B. W. et al. *The SuDS Manual C753*. 5. ed. London: CIRIA, 2015.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. *Técnicas compensatórias em drenagem urbana*. 1 a edição Porto Alegre: ABRH, 2005. 266p.
- BARBOSA, A. R. J. *Elementos de Hidrologia Aplicados ao Estudo de Graduação*. Apostila de curso. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2014.
- BRAGA, P.; MENEZES FILHO, F. C. M. de. Regulação da drenagem urbana nas capitais da região sudeste brasileira. XII Encontro Nacional de Águas Urbanas. ABRH, Anais, Alagoas-Maceió, 2018.
- CANHOLI, A. P. *Drenagem urbana e controle de enchentes / Aluísio Pardo Canholi*. – São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

- CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- CARVALHO, B. P.; FUJIMURA, J. M.; FERNANDES, J. S. de A. Avaliação do uso de cisternas como medida compensatória para atenuação de picos de cheia na Bacia do Pajeú utilizando o SWMM. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, Anais, Florianópolis, 2017.
- CAVALCANTI, A. A. Utilização Do Software SWMM na Modelagem Hidrológica da Sub-bacia do Ribeirão Vai e Volta – Poços De Caldas/Mg. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG, campus Poços de Caldas, 2020.
- COLLODEL, M. G. Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão. 225 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - EESC - USP, São Carlos, 2009.
- COSTA, A. R.; SIQUEIRA, E. Q.; MENEZES FILHO, F. C. M. Curso Básico de Hidrologia Urbana: nível 3. Brasília: ReCESA, 2007. 130 p.
- ECKART, K.; MCPHEE, Z.; BOLISSETTI, T. Performance and implementation of low impact development – A review. *Science of the Total Environment*, v. 607–608, p. 413–432, 2017.
- FLETCHER, T. D.; SHUSTER, W.; H., W. F.; ASHLEY, R.; BUTLER, D.; ARTHUR, S.; TROWSDALE, S.; BARRAUD, S.; SEMADENI-DAVIES, A.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J.; MIKKELSEN, P. S.; RIVARD, G.; UHL, M.; DAGENAIS, D.; VIKLANDER, M. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more - The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, v. 12, n. 7, p. 525-542, 2015.
- FORTLEV, CATÁLOGO TÉCNICO: CAIXA D'ÁGUA FORTLEV. Brasil, 2022. 8 p.
- HAMOUZ, V.; MUTHANNA, T. M.; Hydrological modelling of green and grey roofs in cold climate with the SWMM model. *Journal of Environmental Management*, v. 249, 2019.
- JOSIMOVIC, D.; ALAM, Z. Cost Efficiency of Low Impact Development (LID) Stormwater Management Practices. *Procedia Engineering*, v. 89, p. 734-741, 2014.
- LEE, J.; HYUN, K.; CHOI, J.; YOON, Y.; GERONIMO, F. K. F. Flood reduction analysis on watershed of LID design demonstration district using SWMM 5. *Desalination and Water Treatment*, v. 38, p. 255–261, 2012.
- LEITE, B. P.; FUJIMURA, J. M.; FERNANDES, Jh. S. de A. Avaliação dos impactos na drenagem com a implantação de telhados verdes na UFMT–Campus Cuiabá utilizando o software SWMM. *Simpósio de Geotecnologias no Pantanal*, v. 6, p. 354-363, 2016.
- MARTIN-MIKLE, C. J. et al. Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed. *Landscape and Urban Planning*, v. 140, p. 29–41, 2015.
- MUJIBURREHMAN, K. Mitigating post development flood using Best Management Practices: A study of detention pond. *International Journal of Research in Geography (IJRG)*, v. 4, p. 1-11, 2018.
- OLIVEIRA, A.; COSTA, M. E.; KOIDE, S.; BEZERRA, M.; SOUZA, F.; CARVALHO, C. Avaliação de usos de técnicas compensatórias em sub bacia do Lago Paranoá - Brasília-DF. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, Anais, Florianópolis, 2017.
- PORTO ALEGRE. IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Plano Diretor de Drenagem Urbana – Manual de Drenagem Urbana. Porto Alegre, RS, v. VI, 159 p., 2005.

- RIGHETTO, A.M.; Hidrologia e recursos hídricos. São Carlos: EESC – USP, 1998. 840 p.
- RODRIGUES, A. L. M. Técnicas Compensatórias no Controle de Drenagem em Bacias Hidrográficas Urbanas: Diagnóstico, Viabilidade e Modelagem. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.
- RONQUIM, J.; SOARES, P. F.; SOARES, D. A. F. Gestão da drenagem urbana de Palmas - PR utilizando-se o software SWMM. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, Anais, Brasília, 2015.
- ROSA, D. J.; CLAUSEN, J. C.; DIETZ, M. E. Calibration and verification of SWMM for low impact development. Journal of The American Water Resources Association, v. 51, n. 3, p. 746-757, jun. 2015.
- ROSSMAN, L. A.; EMERITUS, E. S.; EPA, U. S. E. P. A. Storm Water Management Model User's Manual 5.1. Cincinnati: Office of Research and Development - Water Supply and Water Resources Division, 2015.
- ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C.; EPA, U. S. E. P. A. Storm Water Management Model Reference Manual, Volume III – Water Quality. Cincinnati: Office of Research and Development - Water Supply and Water Resources Division, 2016.
- SHIN, D.S.; PARK, J.B.; KANG, D.K.; JO, D.J. An Analysis of Runoff Mitigation Effect Using SWMM-LID Model for Frequently Inundated Basin. Journal of KOSHAM, v.13, n.4, p.303-309, 2013.
- SOIL CONSERVATION SERVICE. Urban hidrology from small watersheds. Nota Técnica-55, Junho, p. 117, 1986.
- SOUZA, F. P.; COSTA, M. E. L.; KOIDE, S. Hydrological modelling and evaluation of detention ponds to improve urban drainage system and water quality. Water, v. 11, n. 8, p. 1-17, 2019.
- TOMAZ, P. Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais, São Paulo, 2002. 475p.
- TOMINAGA, E. N. S.; Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) – USP, São Paulo, 2013.
- TUCCI, C. E. M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, RS, v. 5, n. 1, p. 61-68, jan/mar. 2000.
- TUCCI, C. E. M.; Gestão das águas pluviais urbanas. Ministério das Cidades/Global Water Partnership – Brasília: UNESCO, 2005. 269 p.
- TUCCI, C. E. M.; Hidrologia: ciência e aplicação. 3.ed. Porto Alegre: ABRH, 2004. 943 p.
- TUCCI, C. E. M.; Inundações urbanas. 1.ed. Porto Alegre: ABRH-RHAMA, 2007. 393 p.
- USDA, S. National Engineering Handbook, Hydrology, Section 4. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service (Chapters 4–10), 1972.
- WANG, Y. et al. A Diagnostic Decision Support System for BMP Selection in Small Urban Watershed. Water Resources Management, v. 31, n. 5, p. 1649–1664, 9 mar. 2017b.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da realização deste trabalho puderam ser identificadas as áreas críticas na sub-bacia estudo, as quais são susceptíveis a geração, transporte e acúmulo de escoamento superficial. A identificação destas áreas é essencial na tomada de decisão para alocação de técnicas compensatórias, uma vez que para terem um bom desempenho é preciso que sejam instaladas em locais ideais e que favoreçam a forma de atuação delas, sendo baseadas em infiltração ou armazenamento, e em escala de lote ou de bacia.

A utilização de um modelo hidrológico calibrado e validado para realização do estudo proporcionou analisar o efeito da implantação das técnicas compensatórias através do SWMM, uma vez sendo possível avaliar cenários distintos de ocupação e compará-los entre si e também com a situação atual da sub-bacia.

Desta forma, os resultados deste trabalho apontam a aplicabilidade das técnicas compensatórias como forma de redução das vazões de pico e do escoamento superficial, demonstrando-se assim uma importante ferramenta para tomada de decisões a respeito dos sistemas de drenagem.

Ao comparar o comportamento das técnicas estudadas, observou-se que as técnicas de controle centralizado baseadas em armazenamento possuem uma maior eficácia na redução dos valores de vazão máxima, enquanto às técnicas de controle na fonte com exceção do plantio de vegetação nativa, conseguiram resultados similares entre si. Além disso verificou-se que a medida de plantio de vegetação nativa não demonstrou-se eficaz nas análises realizadas, não sendo indicada como forma de solucionar o problema de cheias da sub-bacia.

Recomenda-se para trabalhos futuros comparação das técnicas já definidas com chuvas distintas, podendo ser variando o tempo de retorno e também com as chuvas utilizadas no estudo para desenvolvimento, calibração e validação do modelo hidrológico desta forma propondo um cenário mais usual e decorrente na bacia de interesse, além de aplicar técnicas distintas das apresentadas, bem como avaliar o comportamento de um conjunto de técnicas e assim propor a forma mais eficiente no controle de cheias para a sub-bacia do ribeirão Vai e Volta no município de Poços de Caldas - MG.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, W.; **Simulações Hidrológicas de cenários de uso e ocupação do solo na bacia drenada pelo Alto Vale do Rio Marrecas (PR)**. 2017. 108 f. Tese (Doutorado Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.
- AHIABLAME, L.M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement. **Journal of Environmental Management**, London, v. 119, p. 151-161, 2013.
- ALMEIDA, G. H. T. D. de; MASINI, L. S.; MALTA, L. R. R. **Hidrologia e drenagem**. Londrina: Educacional S.A., 2017. 200 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Planejamento, manejo e gestão de bacias**. 2012. Disponível em: <<https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/82>>. Acesso em: 14 maio. 2020.
- BAI, Y.; ZHAO, N.; ZHANG, R.; ZENG, X. Storm water management of Low Impact Development in urban areas based on SWMM. **Water**, Basel, v. 11, p. 1-33, 2019.
- BARBOSA, A. R. J. **Elementos de Hidrologia Aplicados ao Estudo de Graduação**. Apostila de curso. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2014.
- CARVALHO, B. P.; FUJIMURA, J. M.; FERNANDES, J. S. de A. Avaliação do uso de cisternas como medida compensatória para atenuação de picos de cheia na Bacia do Pajeú utilizando o SWMM. *In: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 2017, Florianópolis. **Anais** [...]. Florianópolis, ABRH, 2017.
- CHAPMAN, N. A., MCKINLEY, I. G., SHEA, M. E., & SMELLIE, J. A. T. **The Poços de Caldas project: summary and implications for radioactive waste management**. Uppsala: SKB-Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 1991.
- COLLODEL, M. G.; **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão**. 2009. 225 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – EESC - USP, São Carlos, 2009.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES / INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT – **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007.
- GIRONÁS, J.; ROESNER, L. A.; DAVIS, J. **Storm Water Management Model - Applications Manual**. Cincinnati, OH: U. S. Environmental Protection Agency, 2009.
- JOSIMOVIC, D.; ALAM, Z. Cost Efficiency of Low Impact Development (LID) Stormwater Management Practices. **Procedia Engineering**, London, v. 89, p. 734-741, 2014.

LEE, J.; HYUN, K.; CHOI, J.; YOON, Y.; GERONIMO, F. K. F. Flood reduction analysis on watershed of LID design demonstration district using SWMM 5. **Desalination and Water Treatment**, Massachusetts, v. 38, p. 255–261, 2012.

LEITE, B. P.; FUJIMURA, J. M.; FERNANDES, Jh. S. de A. 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, 2016, Cuiabá. **Anais [...]**. Cuiabá, 2016. v. 6, p. 354-363.

LENHS – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (Tradução); **Manual do Usuário EPA SWMM 5.0**. UFPB: 2012.

Ling, K.W.; Mah, D.Y.S. Building Water Sensitive Urban Design: Modelling of Green Roof. **Journal of Civil Engineering, Science and Technology**, Sarauaque, v. 6, n. 2, p. 1-10, 2015.

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

MINISTÉRIO DAS CIDADES / SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL (ORG.). **Águas pluviais: técnicas compensatórias para o controle de cheias urbanas**: guia do profissional em treinamento: nível 2 e 3. Ministério das Cidades / Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). Belo Horizonte: ReCESA, 2007. 52 p.

MUJIBURREHMAN, K. Mitigating post development flood using Best Management Practices: A study of detention pond. **International Journal of Research in Geography (IJRG)**, Ongole, v. 4, p. 1-11, 2018.

NUNES, D. M.; ALVAREZ, M. G.L.; OHNUMA, A. A.; SILVA, L. P. da. Aplicação de técnicas compensatórias no controle dos escoamentos superficiais: estudo de caso em loteamento residencial em Jacarepaguá, Rio de Janeiro. **Revista Internacional de Ciências**, Rio de Janeiro, 2017.

OLIVEIRA, A.; COSTA, M. E.; KOIDE, S.; BEZERRA, M.; SOUZA, F.; CARVALHO, C. Avaliação de usos de técnicas compensatórias em sub bacia do Lago Paranoá - Brasília-DF. *In*: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis, ABRH, 2017.

PALLA, A.; GNECCO, I. Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at urban catchment scale. **Journal of Hydrology**, London, p. 361-368. jun. 2015.

PIRES, A.M; MACEDO, A.L. **Análise comportamental do dispositivo de macrodrenagem implantado na sub bacia 01 da bacia estrada nova, Belém-Pará: canal em galeria de concreto pré-moldado seção retangular com uso de ferramenta computacional - SWMM**. 2011. 59 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade da Amazônia, Belém, 2011.

PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; KOETZ, M. **Caderno didático de estudo de vazão em cursos d'água**. Viçosa: UFV-DEA/GPRH, 2006. 151 p.

QIN, H.; LI, Z.; FU, G. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. **Journal of Environmental Management**, London, v.129, p.1-3, 2013.

RABORI, A. M.; GHAZAVI, R.; REVESHTY, M. A. Sensitivity analysis of SWMM model parameters for urban runoff estimation in semi-arid area. **Journal of Biodiversity and Environmental Sciences**, Bangladesh, v. 10, n. 5, p. 284–294, 2017.

RIGHETTO, A.M.; **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EESC – USP, 1998. 840 p.

RODRIGUES, A. L. M. **Técnicas Compensatórias no Controle de Drenagem em Bacias Hidrográficas Urbanas: Diagnóstico, Viabilidade e Modelagem**. 2020. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

RONQUIM, J.; SOARES, P. F.; SOARES, D. A. F. Gestão da drenagem urbana de Palmas - PR utilizando-se o software SWMM. *In*: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2015, Brasília. **Anais [...]**. Brasília, ABRH, 2015.

SCHUSTER, A. V. B.; **Análise de implementação de medidas compensatórias no sistema de drenagem de São José do Hortêncio – RS com o auxílio do modelo de gestão SWMM**. 2018. 54 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2018.

SHIN, D.S.; PARK, J.B.; KANG, D.K.; JO, D.J. An Analysis of Runoff Mitigation Effect Using SWMM - LID Model for Frequently Inundated Basin. **Journal of KOSHAM**, Seoul, v.13, n. 4, p. 303-309, 2013.

SHINMA, T. A. **Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada à transformação chuva-vazão**. 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SILVA, K. A. **Análise da Eficiência de Métodos de Controle de Enchentes na Atenuação de Picos de Cheias Utilizando o Modelo Computacional SWMM - Storm Water Management Model**. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

SILVA, P. O. da. **Análise de técnicas compensatórias de drenagem urbana para atenuação de inundações em uma sub-bacia do rio Jiquiá no Recife**. 2010. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

SILVA, D. F. **Análise da influência de microrreservatórios em um loteamento e seus efeitos em escala de bacia**. 2016. 146 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SOUZA, F. P.; COSTA, M. E. L.; KOIDE, S. Hydrological modelling and evaluation of detention ponds to improve urban drainage system and water quality. **Water**, Basel, v. 11, n. 8, p. 1-17, 2019.

TOMINAGA, E. N. S.; **Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte**. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) – USP, São Paulo, 2013.

TUCCI, C. E. M.; **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3.ed. Porto Alegre: ABRH, 2004. 943 p.

TUCCI, C. E. M.; **Gestão das águas pluviais urbanas**. Ministério das Cidades/Global Water Partnership – Brasília: UNESCO, 2005. 269 p.

TUCCI, C. E. M.; **Inundações urbanas**. 1.ed. Porto Alegre: ABRH-RHAMA, 2007. 393 p.

VERSINI, P.; JOUVE, P.; BERTHIER, E.; GOUELLO, B. de. Use of green roofs to solve storm water issues at the basin scale: Study in the Hauts-de-Seine County (France). **Urban Water Journal**, London, 2015.

ZANANDREA, Franciele. **Avaliação de Técnicas de Baixo Impacto no Controle de Impactos Hidrológicos em uma Bacia Urbana em Consolidação**. 2016. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.