

IX-036 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO HIDROGRAMA DE CHEIA E SIMULAÇÃO UTILIZANDO SWMM

Alexandre Silveira⁽¹⁾

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Estadual Paulista (1996), Mestrado (1998) e Doutorado (2014) em Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. Atualmente é Professor Associado III da Universidade Federal de Alfenas no Campus Avançado de Poços de Caldas e Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental da UNIFAL-MG.

Matheus Franco Severino⁽²⁾

Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL. Bolsista PIBICT/FAPEMIG.

Allana Abreu Cavalcanti⁽³⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa – UFV. Mestranda em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL. Gestora Ambiental da SEMAD-MG.

Frederico Carlos Martins de Menezes Filho⁽⁴⁾

Engenheiro Civil e Mestre em Engenharia do Meio Ambiente pela Universidade Federal de Goiás (UFG) e Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFGRS). Professor Adjunto da Universidade Federal de Viçosa (UFV) – Campus Rio Paranaíba.

Endereços^(1, 2, 3): UNIFAL – Rodovia José Aurélio Vilela, 11.999, Cidade Universitária – Poços de Caldas – MG – CEP: 37.715-400 – Brasil – Tel: (35) 36974600 - e-mail: alesilveira72@gmail.com; matheusfrancosev@gmail.com; allana.cavalcanti@gmail.com ⁽⁴⁾ Rodovia MG-230, km 7, Rio Paranaíba-MG CEP: 38810-000 – Brasil – Tel: (34) 3855-9382 - e-mail: frederico.menezes@ufv.br

RESUMO

A ocorrência de enchentes e inundações em meio urbano, decorrentes do aumento das vazões e dos volumes de água escoados, é agravada com a impermeabilização do solo durante o processo de urbanização. Com o intuito de estudar o comportamento da drenagem urbana frente a eventos de precipitação, modelos hidrológicos são utilizados no âmbito da bacia hidrográfica. Deste modo, o presente trabalho busca determinar experimentalmente o hidrograma de cheia, em escala de macrodrenagem em uma bacia urbana. O estudo foi desenvolvido na sub-bacia do Ribeirão Vai e Volta, no município de Poços de Caldas (MG), que enfrenta problemas de inundações. Realizou-se a caracterização da bacia hidrográfica em estudo, o monitoramento pluviométrico e fluviográfico, bem como a calibração manual do modelo de chuva-vazão. Após a calibração, foram simulados os hidrogramas de cheia a partir de 4 eventos de precipitação monitorados em campo, no modelo hidrológico *SWMM – Storm Water Management Model*. Foram observados que os hidrogramas experimentais e simulados no SWMM apresentaram comportamento semelhantes de ascensão, estabilização e recessão, após o ajuste no SWMM dos parâmetros: coeficiente de rugosidade para o escoamento superficial e profundidade do armazenamento em depressão nas parcelas permeáveis e impermeáveis das sub-bacias e coeficiente de rugosidade dos condutos. Espera-se através da modelagem hidrológica contribuir na previsão de enchentes e inundações através dos hidrogramas de cheia simulados.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem hidrológica, drenagem urbana, calibração, simulação, SWMM.

1 INTRODUÇÃO

A ocupação desordenada do solo sem o adequado planejamento contribui para o agravamento das enchentes e inundações. Isso ocorre devido ao aumento das áreas impermeáveis e do escoamento superficial associado à redução do tempo de concentração da bacia urbana, apresentando uma elevação na vazão de pico em um curto período de tempo (TUCCI, 2005; CANHOLI, 2005).

De acordo com Silva (2016), a previsão de enchentes e inundações em meio urbano pode ser realizada através de estudos hidrológicos que possibilitam a geração de hidrogramas de cheia, resultantes de séries de

precipitação, a partir de modelos hidráulicos ou hidrodinâmicos para obtenção de níveis de lâmina d'água e vazões em cursos d'água, como por exemplo os modelos de transformação de chuva-vazão.

Segundo Collodel (2009), outra forma de compreender detalhadamente a dinâmica da água na drenagem urbana se dá através do emprego de modelos de simulação, alimentados com dados hidrológicos e características da bacia hidrográfica de estudo. Os programas computacionais CHM, ILLUDAS, SWMM, STORM e IPHS1 destacam-se como modelos hidrológicos mais utilizados no meio científico.

Entre estes modelos, o SWMM – *Storm Water Management Model*, desenvolvido nos Estados Unidos pela EPA – *Environmental Protection Agency*, é muito empregado nos estudos de drenagem urbana por se tratar de uma ferramenta computacional de modelagem capaz de simular quantitativamente e qualitativamente os processos do ciclo hidrológico, além de ser um programa computacional de domínio público livre com código de fonte aberto (COLLODEL, 2009; FARIA, 2013).

Mediante o exposto, este trabalho tem como objetivo utilizar o modelo hidrológico SWMM na simulação dos hidrogramas experimentais de cheia observados em uma bacia do município de Poços de Caldas - MG.

2 METODOLOGIA

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido na sub-bacia do Ribeirão Vai e Volta, situada no município de Poços de Caldas - MG.

A sub-bacia em estudo possui área de 3,96 km² – em que 32,68% encontra-se urbanizado (Figura 1). A rede de drenagem possui comprimento total de 15,30 km, sendo constituída por trechos de canais livres e enterrados.

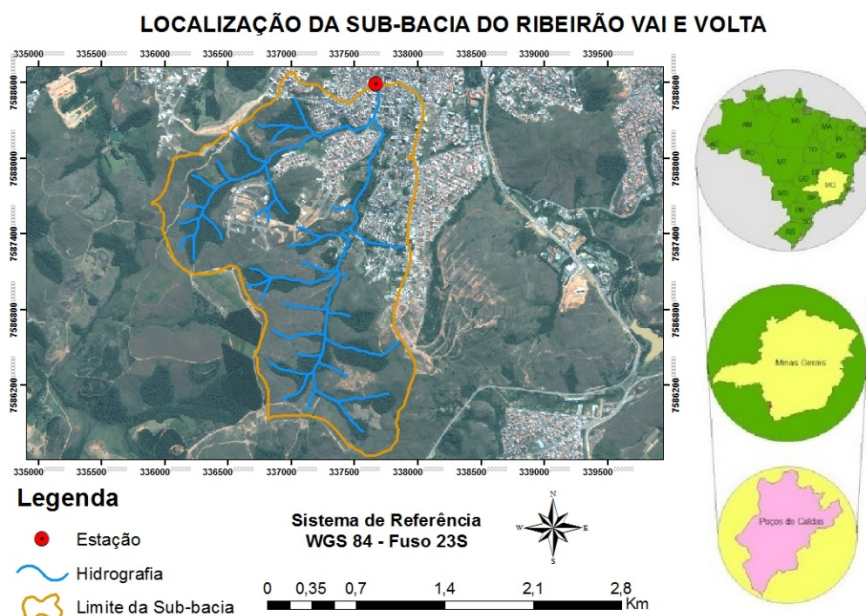


Figura 1: Sub-bacia do Ribeirão Vai e Volta em estudo.

Apresenta como vegetação predominante campo nativo e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual associados aos cursos d'água (IDE-SISEMA, 2018). Possui um total de 87,91 ha de APP - Áreas de Preservação Permanente, sendo 52,15% com cobertura vegetal e 47,85% com uso em conflito (Figura 2).

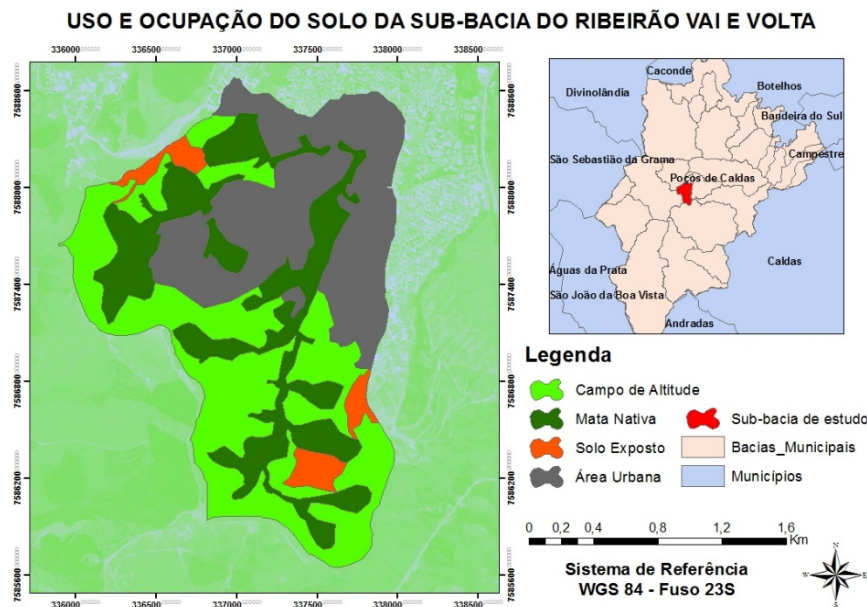


Figura 2: Uso e ocupação do solo da sub-bacia em estudo.

2.2 MATERIAIS

2.2.1 BASE DE DADOS

Para a caracterização da área em estudo, foram utilizados: arquivo *shapefile* da bacia hidrográfica do Ribeirão Vai e Volta, cartografia (mapa do IBGE) e imagem de satélite do *Google Earth* para incorporação e manipulação nos *softwares* *ArcGis* e *AutoCAD*.

2.2.2 ESTAÇÃO FLUVIO-PLUVIOMÉTRICA

Para o monitoramento hidrológico da bacia hidrográfica dispôs-se de uma estação fluvio-pluviométrica localizada à margem esquerda do Ribeirão Vai e Volta, nas coordenadas geográficas latitude 21°47,945'S e longitude 46°34,219'W – *datum* WGS84 (Figura 3).



Figura 3: Estação de monitoramento hidrológico.

Esta estação é equipada com pluviógrafo automático acoplado ao linígrafo, equipamentos utilizados na medição das intensidades de precipitação e dos níveis de lâmina d'água no ribeirão, respectivamente.

2.2.3 SOFTWARE SWMM

Por se tratar de um programa computacional gratuito e amplamente utilizado o SWMM (http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page_id=1017) foi o modelo hidrológico adotado para estudos na sub-bacia do Ribeirão Vai e Volta. Além disso, este modelo apresenta maior flexibilidade de simulação quando comparado com outros modelos hidrológicos, de acordo com Collodel (2009).

2.3 MÉTODOS

2.3.1 CARACTERIZAÇÃO DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA

A caracterização fisiográfica da sub-bacia do Ribeirão Vai e Volta se deu através da determinação dos parâmetros: área total, declividade, áreas permeáveis e impermeáveis, largura média, comprimento dos cursos d'água, entre outros, a partir de mapas cartográficos do IBGE extraídos do ambiente *CAD - Computer Aided Design*, e incorporados e manipulados no *software ArcGis*.

Para o levantamento do uso e ocupação do solo foram utilizadas técnicas de processamento digital da imagem da bacia hidrográfica, referente ao ano de 2013, no *software ArcGis*. Foi necessária a validação destas informações através de levantamentos em campo.

2.3.2 MONITORAMENTO PLUVIOMÉTRICO E FLUVIOGRÁFICO

O monitoramento pluviométrico e fluviográfico foi realizado considerando a estação de monitoramento hidrológico como exutório da bacia.

Para obtenção dos dados sobre chuvas intensas foi realizado o monitoramento pluviométrico através de um pluviógrafo automático, acoplado ao linígrafo, programado para realizar medições de intensidade de precipitação a cada 5 (cinco minutos). O período de monitoramento pluviométrico e fluviográfico foi de setembro de 2017 a outubro de 2018 em que foram registrados 16 eventos, dos quais foram selecionados 4 eventos para este trabalho.

O monitoramento fluviográfico foi dividido em duas etapas, sendo a primeira com a utilização do linígrafo para determinação da variação da lâmina d'água em campo. O linígrafo foi ligado em *datalogger* controlado por um *software* e programado para monitorar o nível de água a cada 5 (cinco) minutos, permitindo assim o levantamento detalhado dos linmigramas. Na etapa seguinte determinou-se a vazão através do emprego da equação de Chézy-Manning, onde o conhecimento dos parâmetros: altura de lâmina d'água, declividade longitudinal do canal, geometria do canal e material que compõe as paredes do canal possibilitaram a determinação das vazões de estudo.

2.3.2.1 Determinação do Hidrograma Experimental

A determinação do hidrograma experimental na seção de estudo, correspondente à localização da estação fluvio-pluviométrica, pautou-se na utilização da equação de Chézy-Manning. Para isto, dispoñdo-se dos níveis d'água registrados, das características geométricas da seção transversal do canal, do coeficiente de rugosidade e da declividade longitudinal, obteve-se o hidrograma experimental. Tal hidrograma experimental fora comparado aos hidrogramas gerados pelo SWMM para 4 eventos de precipitação selecionados.

2.3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

No modelo SWMM foi realizada a discretização da sub-bacia do Ribeirão Vai e Volta em sub-áreas homogêneas, consoante o levantamento da caracterização do uso e ocupação do solo (áreas permeáveis e áreas impermeáveis), o sistema de macrodrenagem existente e o estabelecimento da estação fluvio-pluviométrica como ponto de controle para monitoramento e análise.

Inseriram-se também informações a respeito dos nós, trechos e sistema de drenagem, representado pelo canal principal, obtidas com a base de dados e levantamentos em campo, tão quanto às séries de precipitação registradas na estação. Para separação do escoamento no modelo de infiltração adotou-se o Método do SCS (*Soil Conservation Service*) definindo-se para a área de estudo, o solo pertencente ao grupo hidrológico B. A Figura 4 apresenta a discretização da bacia.

Procedeu-se, então, com a inserção dos 4 eventos de chuva selecionados, a geração dos hidrogramas simulados pelo modelo SWMM.

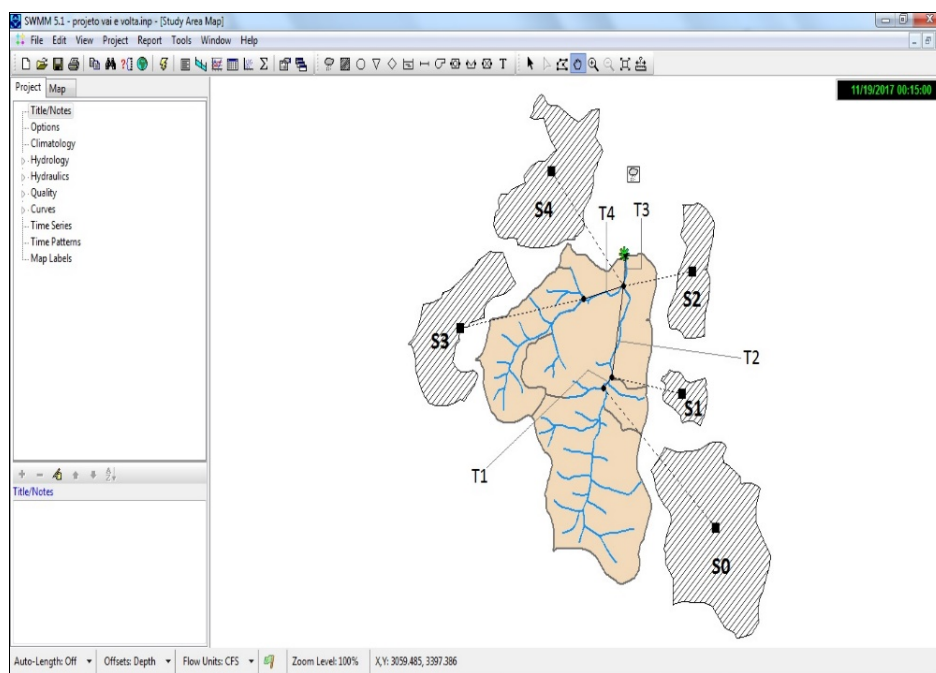


Figura 4: Discretização da sub-bacia em 5 sub-áreas.

Ressalta-se que os trechos T1, T2 e T4 correspondem a canais naturais e o T3, que recebe a contribuição destes trechos, corresponde a um canal aberto de concreto.

2.3.3.1 Calibração do SWMM

Para a calibração do modelo hidrológico no SWMM foram inseridos os dados de vazão, em formato de arquivo texto, obtidos experimentalmente nos estudos a partir da caracterização da bacia hidrográfica, do monitoramento fluviográfico e pluviométrico e do levantamento em campo.

A calibração manual do SWMM foi realizada através da comparação dos hidrogramas gerados pelo modelo com os hidrogramas construídos experimentalmente a partir dos dados do monitoramento hidrológico na bacia. Trata-se, desta forma, de um processo iterativo de tentativa e erro na busca por parâmetros de calibração mais próximos dos valores observados (COLLODEL, 2009).

Procedeu-se a ajustes nos parâmetros de calibração no SWMM, a saber: coeficientes de rugosidade relativos à parcelas das sub-bacias permeáveis e impermeáveis (n-permeável, n-impermeável); as profundidades do armazenamento em depressões em parcelas permeáveis e impermeáveis das sub-bacias (s-permeável e s-impermeável) e o coeficiente de rugosidade para os canais abertos (n). Estes ajustes foram realizados com valores dos intervalos de variação dos parâmetros supracitados estabelecidos no manual do usuário SWMM (LEHS, 2012). A Tabela 1 apresenta os intervalos dos parâmetros utilizados na calibração.

Tabela 1: Intervalos de variação dos parâmetros de calibração no SWMM.

Elementos	Parâmetros	Faixas	Unidades
Sub-bacias	n-permeável	0,13 - 0,80	s/m ^{1/3}
	n-impermeável	0,011 - 0,024	s/m ^{1/3}
	s-permeável	2,54 - 7,62	mm
	s-impermeável	1,27 - 2,54	mm
Canais	n Manning	0,011 - 0,40	s/m ^{1/3}

Consoante LEHNS (2012), esses parâmetros são indicados na literatura para a calibração, dada às dificuldades e incertezas associadas à obtenção destes em campo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os hidrogramas simulados e observados e os eventos pluviométricos selecionados para a sub-bacia do Ribeirão Vai e Volta são apresentados nas Figuras 5 a 8.

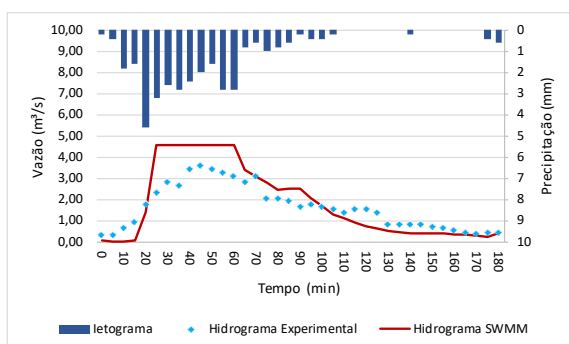


Figura 5: Evento do dia 19/11/2017.

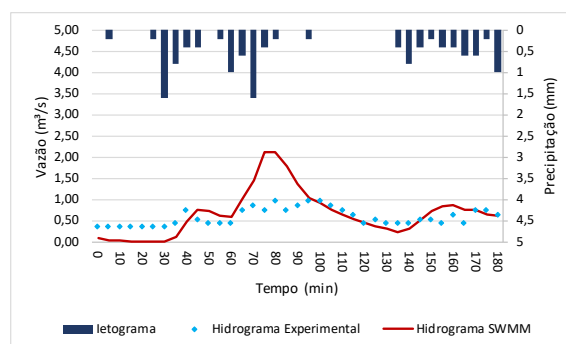


Figura 6: Evento do dia 22/11/2017.

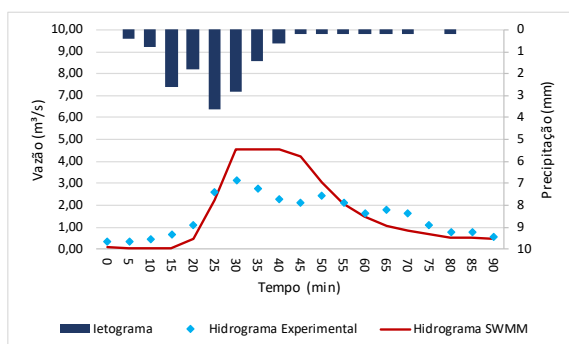


Figura 7: Evento do dia 26/11/2017.

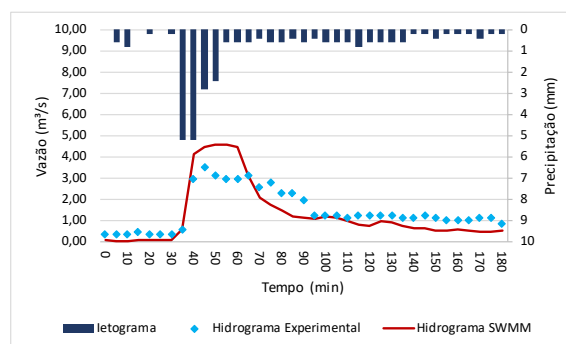


Figura 8: Evento do dia 30/12/2017.

A Tabela 2 apresenta um resumo das informações obtidas com as simulações.

Tabela 2: Resultados obtidos experimentalmente e nas simulações do modelo.

Evento	Precipitação acumulada (mm)	Vazão de pico observada (m³/s)	Vazão de pico simulada (m³/s)	Volume escoado superficialmente (m³)
19/11/2017	57,4	3,63	4,56	14.691,59
22/11/2017	13,2	0,97	2,12	2.532,82
26/11/2017	15,4	3,10	4,56	6.460,40
30/12/2017	31,2	3,46	4,56	12.064,59

Com base nos resultados obtidos, observou-se que maiores intensidades de precipitação ocasionam maiores picos de vazão, resultantes do aumento dos volumes escoados em um determinado tempo na bacia. Além disso, pode ser verificado que as vazões experimentais e simuladas no SWMM apresentam comportamentos semelhantes de ascensão, estabilização e recessão durante a ocorrência de eventos de precipitação.

Ressalta-se que parâmetros de calibração como: coeficiente de rugosidade para o escoamento superficial nas parcelas permeáveis e impermeáveis das sub-bacias, profundidade do armazenamento em depressão nas parcelas permeáveis e impermeáveis das sub-bacias, e coeficiente de rugosidade dos condutos, foram ajustados a fim de se obter hidrogramas simulados mais próximos dos hidrogramas experimentais para a sub-bacia em estudo.

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo determinar os hidrogramas de cheia na sub-bacia do ribeirão Vai e Volta, em Poços de Caldas – MG, buscando representar da melhor forma o processo de escoamento superficial em uma bacia urbana. Para tanto, realizou-se o monitoramento hidrológico e a caracterização fisiográfica da área de estudo. Tomando-se 4 eventos de chuva na bacia em estudo, obtiveram-se hidrogramas experimentais por meio da equação de Chézy-Manning. Posteriormente, com os dados de campo e os eventos registrados, utilizou-se o modelo SWMM para geração dos hidrogramas, objetivando-se a calibração manual do modelo construído.

Com o levantamento do uso e ocupação do solo realizou-se a discretização das áreas da bacia 5 sub-áreas e destas duas apresentaram cerca de 93% a 100% das áreas permeáveis. Contudo, apesar da sub-bacia do Ribeirão Vai e Volta possuir aproximadamente 33% de áreas urbanizadas, quando ocorrem eventos de precipitação intensa, as vazões se elevam em curto período de tempo, ocasionando inundações a jusante do ponto de monitoramento.

O modelo SWMM apresentou bons resultados na simulação dos eventos com a determinação dos hidrogramas de cheia, quando comparados com os hidrogramas experimentais. Foi verificado que apesar dos valores de pico observados e simulados não terem atingido o mesmo patamar, os ramos de ascensão, estabilização e recessão na curva de vazão apresentaram um mesmo comportamento em intervalos de tempo semelhantes. Todavia houve uma majoração dos valores simulados, inculcando a necessidade da continuidade da calibração dos parâmetros de modo a reduzir tal discrepância.

Os parâmetros de calibração do modelo SWMM que mais influenciaram nos resultados de simulação foram: coeficiente de rugosidade para o escoamento superficial nas parcelas permeáveis e impermeáveis das sub-áreas, profundidade do armazenamento em depressão nas parcelas permeáveis e impermeáveis das sub-áreas, e coeficiente de rugosidade dos condutos. Estes parâmetros considerados sensíveis em uma simulação, apesar de obtidos da literatura, são de difícil determinação pois requerem um conhecimento prévio das características físicas e das interações dos processos do ciclo hidrológico da sub-bacia em estudo.

Com base neste trabalho, conclui-se que o modelo SWMM é capaz de simular a drenagem urbana na sub-bacia do ribeirão Vai e Volta, sendo uma importante ferramenta para o manejo das águas pluviais. Ressalta-se que a devida continuidade do monitoramento hidrológico da bacia, bem como uma maior discretização espacial da área de estudo, trarão melhorias aos resultados da modelagem hidrológica. Não menos importante, a continuidade dos processos de calibração e a sua devida validação, subsidiarão a adequada gestão das águas pluviais na bacia, avaliando alternativas do emprego de técnicas compensatórias na redução do escoamento superficial.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo apoio financeiro (APQ-01982-14) e concessão de bolsa de iniciação científica.

À Prefeitura Municipal de Poços de Caldas por ter possibilitado a instalação da estação de monitoramento hidrológico no ribeirão Vai e Volta, bem como pelo fornecimento da base dados utilizada neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CANHOLI, A. P.; **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
2. 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.
3. FARIA, N. de O.; **Estudo da impermeabilização, monitoramento, modelagem e simulação de cenários para a bacia do Barbado - Cuiabá/MT**. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - UFSCar, São Carlos, 2013.

4. IDE-SISEMA (INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DO SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS). Disponível em: < <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>>. Acesso em: 11 outubro 2018.
5. SILVA, D. F.; **Análise da influência de microrreservatórios em um loteamento e seus efeitos em escala de bacia**. 146 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - EESC, USP, São Carlos, 2016.
6. TUCCI, C. E. M.; **Gestão das águas pluviais urbanas**. Ministério das Cidades/Global Water Partnership – Brasília: UNESCO, 2005, 269p.