

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

TAINAH CHRISTINA TEIXEIRA DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DE VAZÕES MÁXIMAS ESTIMADAS A PARTIR DOS
MODELOS HEC-HMS E SWMM – ESTUDO DE CASO PARA O
NÚCLEO URBANO E REGIÃO PERIURBANA DE MUNIZ FREIRE**

VITÓRIA

2017

TAINAH CHRISTINA TEIXEIRA DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DE VAZÕES MÁXIMAS ESTIMADAS A PARTIR DOS
MODELOS HEC-HMS E SWMM – ESTUDO DE CASO PARA O
NÚCLEO URBANO E REGIÃO PERIURBANA DE MUNIZ FREIRE**

Orientador:

Prof. Dr. José Antônio Tosta Reis

Projeto apresentado ao Programa de Pós-graduação de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, na área de concentração Saneamento Ambiental e Saúde Pública.

VITÓRIA

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)
Sandra Mara Borges Campos – CRB-6 ES-000593/O

S729a Souza, Tainah Christina Teixeira de, 1992-
Avaliação de vazões máximas estimadas a partir dos modelos
HEC-HMS e SWMM : estudo de caso para o núcleo urbano e
região periurbana de Muniz Freire / Tainah Christina Teixeira de
Souza. – 2017.
114 f. : il.

Orientador: José Antônio Tosta Reis.
Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento
Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro
Tecnológico.

1. Drenagem. 2. Modelo chuva-vazão. 3. Modelo SWMM
(Storm Water Management Model). 4. Modelo HEC-HMS
(Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System).
5. Vazão de projeto (Hidrologia). 6. escoamento superficial
(Hidrologia). 7. Muniz Freire (ES). I. Reis, José Antônio Tosta. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.
Título.

CDU: 628

TAINAH CHRISTINA TEIXEIRA DE SOUZA

Avaliação de Vazões Máximas Estimadas a partir dos Modelos HEC-HMS e SWMM - Estudo de caso para o Núcleo Urbano e Região Periurbana de Muniz Freire


Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável na área de concentração Saneamento Ambiental e Saúde Pública.

Aprovada em 04 de agosto de 2017.

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. D.Sc. José Antônio Tosta Reis
Orientador - PPGES / CT/ UFES



Prof. Dr. Daniel Rigo
Examinador Interno - PPGES / CT/ UFES



^{p/} Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva
Examinador Externo - IRN / UNIFEI

Ao meu amado Vítor, aos meus avós Nicéa e Adhemar, à minha irmã Maria Eduarda, aos meus pais Gercilene e Fábio e à minha tia Magna.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder a vida, determinação e oportunidades nesta trajetória.

Ao meu amado Víctor pela parceria de vida e por toda paciência nos momentos de ansiedade e incerteza.

Aos meus queridos avós, pais e à minha irmã Duda pelo carinho, apoio e amor incondicional.

Aos meus amigos por entenderem minhas ausências em alguns momentos e por toda força e incentivo para realização desta pesquisa.

Ao meu orientador José Antônio Tosta peça amizade e dedicação, propiciando encontros, reflexões e questionamentos, de tamanha importância para minha formação acadêmica e profissional.

À banca de defesa e qualificação, por atuar com disponibilidade e profissionalismo, oferecendo importantes contribuições para esta pesquisa.

RESUMO

A determinação da vazão de projeto constitui etapa fundamental para o adequado dimensionamento de obras de drenagem ou para possibilitar a adequada tomada de decisão sobre medidas não estruturais relacionadas com a drenagem pluvial. Em regiões que não dispõem de dados fluviométricos recorre-se, usualmente, à utilização dos modelos do tipo chuva-vazão para determinação indireta da vazão de projeto. Função da diversidade de modelos disponíveis, cabe ao modelador a escolha do modelo mais adequado às singularidades da área avaliada, permitindo a produção de resultados que se apresentem mais próximos da realidade. Neste estudo foi realizada a análise comparativa dos modelos *Storm Water Management Model* (SWMM) e *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) quando da estimativa de vazões máximas associadas ao núcleo urbano e regiões periurbanas do município de Muniz Freire (ES). A estimativa do escoamento superficial foi realizada através do método Hidrograma Unitário e as perdas de infiltração pelo método SCS *Curve Number*. A equação de chuvas intensas foi apropriada através do método de Chow-Gumbel e a chuva de projeto pelo método dos blocos alternados. Os modelos apresentaram relevantes diferenças nos valores de vazão de pico e volume de escoamento superficial. Para períodos de retorno entre 2 e 5 anos, os valores de vazão de pico e volumes de escoamento superficial estimados pelo SWMM apresentaram-se superiores aos obtidos pelo HEC-HMS para todas as bacias avaliadas, invertendo-se esta tendência com o aumento do período de retorno. As simulações associadas aos períodos de recorrência de 10 e 20 anos, usualmente utilizados em estudos e projetos de drenagem urbana, foram as que se apresentaram mais próximas, com as menores diferenças relativas para as variáveis hidrológicas avaliadas.

Palavras-chave: Drenagem urbana, modelo chuva-vazão, SWMM, HEC-HMS, vazão de projeto, escoamento superficial

ABSTRACT

The determination of the project flow is a fundamental step for the correct design of drainage works or to enable the adequate decision making about non-structural actions related to Rainwater drainage. In areas that do not have fluviometric data are usually used the rainfall-flow models for indirect determination of the project flow. Function of the diversity of available models, it is up to the modeler to choose the model most appropriate to the singularities of the evaluated area. In this study, a comparative analysis of the Storm Water Management Model (SWMM) and Hydrologic Engineering Center (HEC-HMS) models was performed about estimating the maximum flows associated with the urban area and periurban regions of Muniz Freire city, Espírito Santo. The estimation of the surface runoff was performed through the Unitary Hydrograph method and the losses of infiltration by the Chow-Gumbel method and the design rain by the alternating blocks method. The models presented relevant differences in the values of peak flow and volume of runoff. For recurrence periods between 2 and 5 years, the peak flow values and runoff volumes estimated by the SWMM were higher than those obtained by the HEC-HMS for all the basins evaluated, reversing this trend with the increase of the period of return. The simulations associated with the 10 and 20 year recurrence periods, usually used in urban drainage studies and projects, were the ones that presented the closest, with the lowest relative differences for the hydrological variables evaluated.

Key-words: Urban drainage, rain-flow model, SWMM, HEC-HMS, project flow, runoff.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Blocos componentes no modelo SWMM e suas relações	31
Figura 2 - Localização do município de Muniz Freire no Espírito Santo.....	49
Figura 3 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do ribeirão Vargem Grande e sua relação com o núcleo urbano da sede municipal de Muniz Freire.....	50
Figura 4 - Mapa de localização da sub-bacia 1	51
Figura 5 - Mapa de localização da sub-bacia 2.....	52
Figura 6 - Mapa de localização da estação pluviométrica Usina Fortaleza e sua relação com a bacia do ribeirão Vargem Grande	57
Figura 7 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do Ribeirão Vargem Grande	65
Figura 8 - Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia 1	65
Figura 9 - Mapa de uso e ocupação do solo na sub-bacia 2.....	66
Figura 10 - Mapa de pedologia da bacia do Ribeirão Vargem Grande	66
Figura 11 - Mapa de pedologia da sub-bacia 1	67
Figura 12 - Mapa de pedologia da sub-bacia 2	67
Figura 13 – Fluxograma das atividades associadas à aplicação do modelo SWMM	71
Figura 14 – Interface gráfica da tela principal do modelo SWMM: representação do modelo de sub-bacia	72
Figura 15 – Tela de entrada para o hietograma de projeto	73
Figura 16 – Fluxograma de atividades associadas à aplicação do modelo HEC-HMS	74
Figura 17 - Interface gráfica da tela principal do modelo HEC-HMS: representação do modelo de sub-bacia	75
Figura 18 - Gerenciador de modelo metereológico no HEC-HMS.....	76
Figura 19 – Curvas intensidade x duração para diferentes períodos de recorrência para a estação pluviométrica Usina Fortaleza.....	81
Figura 20 – Hietogramas das chuvas de projeto associadas à sub-bacia 1, considerando períodos de retorno de 10 anos (superior), 50 anos e 100 anos (inferior), respectivamente.....	83
Figura 21 - Variação da área das bacias em função dos valores de CN.....	84

Figura 22 - Vazões de pico estimadas para a bacia concentrada pelos SWMM e HEC-HMS.....	87
Figura 23 - Escoamento superficial total estimado para a bacia concentrada pelos modelos SWMM e HEC-HMS	87
Figura 24 – Gráfico de dispersão para vazões de pico estimadas para a bacia concentrada pelos modelos SWMM e HEC-HMS	88
Figura 25 – Gráfico de dispersão para volumes totais escoados superficialmente estimados para a bacia concentrada pelos modelos SWMM e HEC-HMS	88
Figura 26 - Hidrogramas produzidos para a bacia concentrada a partir das simulações conduzidas com o modelo SWMM	89
Figura 27 - Hidrogramas produzidos para a bacia concentrada a partir das simulações conduzidas com o modelo HEC -HMS	90
Figura 28 - Vazões de pico estimadas para a sub-bacia 1 pelos SWMM e HEC-HMS	93
Figura 29 - Escoamento superficial total estimado para a sub-bacia 1 pelos modelos SWMM e HEC-HMS	93
Figura 30 – Gráfico de dispersão para vazões de pico estimadas para a sub-bacia 1 pelos modelos SWMM e HEC-HMS.....	95
Figura 31 – Gráfico de dispersão para volumes totais escoados superficialmente estimados para a sub-bacia 1 pelos modelos SWMM e HEC-HMS	95
Figura 32 - Hidrogramas produzidos para a sub-bacia 1 a partir das simulações conduzidas com o modelo SWMM.....	96
Figura 33 - Hidrogramas produzidos para a sub-bacia 1 a partir das simulações conduzidas com o modelo HEC-HMS	97
Figura 34 - Vazões de pico estimadas para a sub-bacia 2 pelos SWMM e HEC-HMS	98
Figura 35 - Escoamento superficial total estimado para a sub-bacia 2 pelos modelos SWMM e HEC-HMS	99
Figura 36 – Gráfico de dispersão para vazões de pico estimadas para a sub-bacia 2 pelos modelos SWMM e HEC-HMS.....	99
Figura 37 – Gráfico de dispersão para volumes totais escoados superficialmente estimados para a sub-bacia 2 pelos modelos SWMM e HEC-HMS	100

Figura 38 - Hidrogramas produzidos para a sub-bacia 2 a partir das simulações conduzidas com o modelo SWMM.....	101
Figura 39 - Hidrogramas produzidos para a sub-bacia 2 a partir das simulações conduzidas com o modelo HEC-HMS.....	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição dos critérios de classificação dos modelos matemáticos .	25
Quadro 2- Opções de modelagem disponíveis no HEC-HMS.....	41
Quadro 3 - Opções de modelagem de precipitação disponíveis no HEC-HMS....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre as alturas pluviométricas para precipitações de mesma frequência e diferentes durações.	56
Tabela 2 - Classificação dos solos considerando as condições brasileiras.	61
Tabela 3 - Tabela de valores de CN do SCS de acordo com uso e ocupação do solo e as condições hidrológicas (condição II de umidade)	62
Tabela 4 - Valores de CN considerados no estudo	63
Tabela 5 - Parâmetros fisiográficos das unidades hidrográficas	79
Tabela 6 - Precipitações máximas anuais medidas na estação Usina Fortaleza entre os anos 1957 e 2015.....	79
Tabela 7 - Precipitações máximas anuais de 1 dia associadas a diferentes períodos de recorrência para a estação Usina Fortaleza.....	80
Tabela 8 - Precipitações máximas (em mm) para a estação pluviométrica Usina Fortaleza, associadas a diferentes períodos de recorrência e durações	80
Tabela 9 - Tempo de concentração obtido para as bacias avaliadas.....	82
Tabela 10 - Valores de CN obtidos para as unidades hidrográficas.....	84
Tabela 11 - Percentagem de área impermeável para as unidades hidrográficas.	85
Tabela 12 - Tempo de retardo obtido para as unidades hidrográficas	85
Tabela 13 - Vazão de pico e volume de escoamento superficial estimado para a bacia do Ribeirão Vargem Grande	86
Tabela 14 - Vazão de pico e volume de escoamento superficial estimado para a Sub-bacia 1	92
Tabela 15 - Vazão de pico e volume de escoamento superficial estimado para a Sub-bacia 2	98

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

ASTER – *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection*

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CN – Número da Curva

EPA – *Environmental Protection Agency*

GEOBASES – Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo

HEC-HMS – *Model Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*

HEC-RAS – *Model Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDF – Intensidade-duração-frequência

INCAPER – Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MDE – Modelo Digital de Elevação

NRCS – Serviço de Conservação de Recursos Naturais

SCS – *Soil Conservation Service*

SWMM – *Storm Water Management*

USACE – *United States Army Corps of Engineers*

USDA – United States Department of Agriculture

USEPA – *United States Environmental Protection Agency*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1	IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO NA DRENAGEM URBANA.....	19
3.2	MÉTODOS INDIRETOS PARA ESTIMATIVA DE VAZÃO.....	21
3.3	USO DE MODELOS COMPUTACIONAIS NA DRENAGEM URBANA.....	24
3.4	MODELOS HIDROLÓGICOS.....	27
3.4.1	O modelo SWMM	29
3.4.2	Modelo HEC-HMS	38
4	ÁREA DE ESTUDO.....	48
4.1	SUBDIVISÃO DA BACIA DO RIBEIRÃO VARGEM GRANDE.....	50
5	METODOLOGIA.....	48
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	48
5.2	INFORMAÇÕES FISIAGRÁFICAS E HIDROLÓGICAS.....	52
5.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA	54
5.3.1	Equação de chuvas intensas.....	54
5.3.2	Tempo de concentração	57
5.3.3	Construção dos hietogramas de projeto	58
5.3.4	Determinação dos demais parâmetros para modelagem hidrológica	59
5.3.5	Estimativa da vazão de pico e do escoamento superficial.....	69
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
6.1	CARACTERÍSTICAS FÍSIOGRÁFICAS.....	78
6.2	EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS.....	79

6.3	TEMPOS DE CONCENTRAÇÃO E HIETOGRAMAS DE PROJETO.....	81
6.4	PARÂMETROS PARA MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	83
6.5	RESPOSTA HIDROLÓGICA PARA A BACIA DO RIBEIRÃO VARGEM GRANDE	85
6.5.1	Vazões de pico e volumes escoados para a bacia Concentrada.....	85
6.5.2	Vazões de pico e volumes escoados para a Sub-bacia 1.....	92
6.5.3	Vazões de pico e volumes escoados para a Sub-bacia 2.....	97
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	104
	REFERÊNCIAS.....	102
	APÊNDICE 1.....	110

1 INTRODUÇÃO

A inundação urbana ocorre quando as águas dos rios, córregos ou galerias pluviais saem do leito de escoamento devido à falta de capacidade de transporte de um destes sistemas, ocupando áreas que a população utiliza para moradia, transporte, recreação, indústria, comércio, dentre outros usos. Os eventos de inundação podem ocorrer devido ao comportamento natural dos cursos d'água ou ainda serem ampliados pelas alterações antrópicas decorrentes da urbanização, constituindo um dos principais focos de preocupação para os gestores públicos (TUCCI; BERTONI, 2003; RIBEIRO; LIMA, 2011; RIBEIRO NETO *et al.*, 2015).

De acordo com Muller (2011), grande parte das cidades brasileiras desenvolveu-se às margens de cursos d'água sem que as questões envolvidas com a drenagem fossem consideradas nas decisões sobre planejamento do uso e ocupação do solo e da preservação dos escoamentos hídricos naturais. Segundo Cruz e Tucci (2008), o crescimento das malhas urbanas tem provocado o aumento da frequência e magnitude das inundações, assim como dos processos erosivos do solo e a contaminação das águas pluviais, trazendo riscos e prejuízos à população que ocupa as áreas suscetíveis aos eventos de cheia.

Conforme estabelecido por Silva *et al.* (2014), o equacionamento do problema das inundações é complexo, uma vez que envolve um conjunto de ações interdisciplinares sobre a bacia hidrográfica, que deve ser vista como um sistema integrado e dinâmico, afim de evitar que a aplicação equivocada de medidas isoladas venha a transferir o problema das inundações para outras áreas.

Para o dimensionamento de quaisquer obras hidráulicas de drenagem ou ainda para permitir a adequada tomada de decisão sobre medidas estruturais e não estruturais, há a necessidade de determinação da vazão de projeto associada a uma frequência de ocorrência (NAKAYAMA *et al.*, 2013; TEIXEIRA *et al.*, 2011).

Quando registros fluviométricos estão disponíveis para o local ou nas proximidades da região de interesse, o cálculo da vazão de projeto pode ser feito por meio de método direto, que consiste na aplicação de uma distribuição de probabilidade à série histórica de vazões máximas. No entanto, como a ausência de dados fluviométricos é a situação mais comumente encontrada, principalmente

em pequenas bacias hidrográficas, usualmente recorre-se à utilização dos métodos indiretos para determinação da vazão de projeto, destacando-se o uso dos modelos matemáticos do tipo chuva-vazão.

Segundo Righetto *et al.* (2009), os modelos matemáticos do tipo chuva-vazão simulam os processos de escoamento na bacia, podendo ser utilizados em projetos de estruturas de drenagem, na estimativa do nível de enchente ou ainda na avaliação do impacto da urbanização sobre o sistema de drenagem.

A modelagem matemática do processo de transformação chuva-vazão constitui, portanto, importante ferramenta para avaliação do comportamento da drenagem durante eventos chuvosos, permitindo a reprodução do comportamento dos sistemas de drenagem sob condições variadas e a previsão de inundações e alagamentos (GICHAMO *et al.*, 2012; SANTOS, 2009).

No entanto, é fundamental que o modelador possua conhecimento acerca do funcionamento, estrutura, métodos e parâmetros associados aos modelos matemáticos disponíveis, assim como das limitações apresentadas por cada modelo. O adequado entendimento destes aspectos permitirá a escolha do modelo computacional mais adequado, dadas as características de cada área de estudo e a disponibilidade de dados, permitindo a produção de resultados que se apresentem mais próximos da realidade.

O *Storm Water Management Model* (SWMM) é um modelo computacional do tipo chuva-vazão desenvolvido pelo *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), comumente aplicado em simulações quantitativas e qualitativas dos processos de escoamento, especialmente em áreas urbanas, embora seja, também, aplicável em áreas rurais (RAI, 2016; USEPA, 2012; PARK *et al.*, 2008).

O modelo *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), por sua vez, foi desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos como ferramenta de simulação hidrológica dos processos de transformação de chuva em vazão em bacias hidrográficas dendríticas, possibilitando a estimativa do escoamento superficial por meio de modelos tradicionalmente utilizados em hidrologia, com vistas ao planejamento da drenagem urbana (USACE, 2010).

Neste contexto, o presente estudo tem como principal objetivo comparar as respostas dos modelos SWMM e HEC-HMS quando da estimativa de vazões máximas associadas ao núcleo urbano e regiões periurbanas do município capixaba de Muniz Freire.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o emprego dos modelos HEC-HMS e SWMM para avaliação de vazões máximas em áreas urbanas e periurbanas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reunir e sistematizar informações fisiográficas e climatológicas necessárias à aplicação dos modelos SWMM e HEC-HMS;
- Estimar, com auxílio dos modelos SWMM e HEC-HMS, vazões de pico e volume de escoamento superficial para diferentes períodos de retorno na área de estudo selecionada e;
- Comparar as estimativas de vazões de pico e volume de escoamento superficial produzidas pelos modelos SWMM e HEC-HMS.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO NA DRENAGEM URBANA

O Brasil enfrenta um problema comum aos países em desenvolvimento: o crescimento rápido e desordenado dos centros urbanos. O aumento das cidades gera problemas de infraestrutura e grandes modificações no meio ambiente. Essas modificações vêm provocando um aumento significativo no volume de escoamento superficial e nas vazões de pico, originando ou intensificando as catástrofes urbanas causadas pelas enchentes (SALVAN *et al.*, 2016; CABRAL *et al.*, 2015; CANHOLI, 2005; TUCCI, 2005; GARCIA, 2005).

Segundo Garcia (2005), as enchentes decorrentes da urbanização não são exclusividade dos grandes centros urbanos, uma vez que as cidades menores também vem sendo afetadas pelos prejuízos econômicos e sociais provocados por eventos de inundação.

De acordo com Cruz e Tucci (2008), o crescimento urbano desordenado das cidades brasileiras tem elevado a frequência e a magnitude das inundações, os processos erosivos do solo e a contaminação das águas pluviais. Tais efeitos decorrem do aumento considerável nas superfícies impermeáveis e da canalização descontrolada dos caminhos naturais do escoamento pluvial.

Esta impermeabilização causada pela urbanização provoca alterações locais na circulação de água, por meio de ruas pavimentadas, telhados, calçadas e pátios e, em alguns casos, através de solos urbanos demasiadamente compactados, os quais oferecem menor resistência ao escoamento superficial do que as condições naturais do solo, reduzindo, consideravelmente, a infiltração da água pelo perfil do solo e a recarga de água subterrânea. Em consequência da elevação da taxa de impermeabilização da superfície, tem-se o aumento do volume e da velocidade do escoamento superficial, gerando modificações no hidrograma produzido, com redução do tempo de pico e aumento da vazão máxima (SANTOS, LOLLO, 2016; LIU *et al.*, 2014; RODRIGUES *et al.*, 2013; SOUZA, 2013; CUNHA *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2012, GARCIA, 2005).

Chabaeva *et al.* (2009) destacam que além de afetar os processos hidrológicos da bacia, o aumento nas superfícies impermeáveis provoca também: alterações

fisiográficas (mudanças na morfologia e na temperatura dos cursos d'água); qualitativas (depleção na qualidade das águas devido ao aumento da descarga de poluentes) e; biológicas (redução da biodiversidade do meio aquático).

Tucci (1995) observa que as cheias em áreas urbanas são consequência de dois processos, que ocorrem isoladamente ou de forma integrada: as enchentes em áreas ribeirinhas, que são as cheias naturais, decorrentes dos processos do ciclo hidrológico, que ocupam o leito maior dos cursos d'água, ocorrendo, em média, com tempo de retorno superior a dois anos, e; as enchentes devido à urbanização, que são aquelas decorrentes das modificações impostas pelos processos de urbanização, interferindo nas etapas de infiltração, retenção, evapotranspiração e velocidade dos escoamentos.

Os impactos sobre a população decorrentes das enchentes em áreas ribeirinhas são causados, principalmente, pela ocupação inadequada do espaço urbano, provocando prejuízos por perdas materiais e humanas, interrupção de atividades econômicas nas áreas inundadas, contaminação por doenças de veiculação hídrica e depleção da qualidade das águas. Os impactos das enchentes devido à urbanização, por sua vez, são o aumento das vazões máximas, aumento na produção de sedimento e material sólido pela bacia hidrográfica, depleção da qualidade da água pluvial e a contaminação de aquíferos (WOLFF, 2016; LIQING; ALLEN, 2014; SANTOS, 2010; TUCCI, 1995).

A inexistência de restrições quanto à ocupação de áreas de risco de inundação na maioria dos Planos Diretores Urbanos brasileiros, associada a uma sequência de anos sem enchentes, constitui-se como razão suficiente para que áreas de risco menor fossem indevidamente ocupadas e, quando atingidas pelas enchentes com frequências de ocorrência menores, sofrem prejuízos significativos (TUCCI, 1995; GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ, 2002).

No que tange à urbanização, os problemas são decorrentes da forma desorganizada como a infraestrutura é implantada. As pontes e taludes de estradas que obstruem o escoamento, a redução da seção do escoamento por aterros, a obstrução de rios, canais e condutos por deposição de resíduos sólidos e sedimentos, além dos projetos e obras de drenagem inadequadas, agravam o problema das enchentes (MULLER, 2011).

As enchentes urbanas são um problema crônico no Brasil devido, principalmente, à gerência inadequada do planejamento da drenagem e à equivocada filosofia observada nos projetos de engenharia, que visam o escoamento da água precipitada o mais rápido possível para fora da área projetada, transferindo os problemas para as áreas situadas à jusante. Como consequência são produzidos custos extremamente altos para a sociedade como um todo (SOUZA, 2013; TUCCI, 1995).

A falta de planejamento e regulamentação é observada em praticamente todas as cidades brasileiras de médio e grande porte. Depois que o espaço se encontra totalmente ocupado, as soluções disponíveis são extremamente caras (intervenções estruturais como canalizações, diques com bombeamentos, reversões e barragens) e o poder público passa a investir parte significativa de seu orçamento para proteger uma parcela da cidade que sofre com a inadequada ocupação do solo (VILLANUEVA, 1990 *apud* GARCIA, 2005).

As soluções para o problema de drenagem urbana envolvem um conjunto complexo de ações multidisciplinares sobre a bacia hidrográfica, compostas por medidas de caráter preventivo e/ou corretivo. Neste contexto, o conhecimento da vazão de projeto é um aspecto relevante para a devida tomada de decisão sobre medidas de intervenção sobre a bacia, quer sejam estruturais ou não estruturais.

3.2 MÉTODOS INDIRETOS PARA ESTIMATIVA DE VAZÃO.

De acordo com Nakayama *et al.* (2013) a adequada determinação da vazão de projeto é fundamental para o correto dimensionamento de quaisquer obras hidráulicas de drenagem urbana.

Pinheiro e Naghettini (2010) destacam ainda a importância do conhecimento de variáveis e funções hidrológicas em uma dada seção fluvial, bem como de suas séries temporais de vazões para a viabilização de uma série de projetos relacionados à gestão dos recursos hídricos.

Entretanto, conforme disposto por Gontijo (2007), a determinação de vazões de projeto consiste num processo complexo por se tratar de um fenômeno natural e envolve diversos fatores intervenientes, como capacidade de infiltração,

porcentagem de escoamento básico, descarga superficial, tempo de armazenamento superficial e índice de umidade do solo.

De acordo com a disponibilidade de dados hidrológicos na área de estudo, diversos métodos para determinação do escoamento superficial podem ser utilizados. Estes métodos de quantificação de cheias podem ser diretos ou indiretos.

Os métodos diretos são aqueles que se baseiam apenas nos registros fluviométricos para estimativa da vazão de projeto, por meio de distribuições estatísticas de probabilidades. É relevante observar que os métodos diretos só devem ser utilizados quando existem dados históricos de vazão e nível d'água e as condições da bacia estudada não se modificaram substancialmente no intervalo de tempo correspondente à série histórica. No entanto, como a ausência de dados fluviométricos é a situação mais comumente encontrada, os métodos indiretos de estimativa de vazões são recorrentemente empregados. Nestes métodos são utilizados registros pluviométricos e uma técnica específica para transformação de chuva em vazão (NAKAYAMA *et al.*, 2013; COLLISTON; TASSI, 2008; GONTIJO, 2007; CANHOLI, 2005).

Segundo Gontijo (2007), os métodos indiretos podem ser classificados em quatro grupos: fórmulas empíricas (atualmente em desuso), método racional (para microbacias que não ultrapassem os 5 km²), método do hidrograma unitário e simulação hidrológica por modelos conceituais de precipitações máximas. A escolha do método dependerá do objetivo a ser alcançado, dos dados disponíveis, da importância do projeto e de suas consequências, da superfície e das características da área estudada.

De acordo com o disposto por Kaiser (2006), os referidos grupos que compõem os métodos indiretos de determinação das vazões de projeto podem ser sumariamente descritos da seguinte maneira:

- Fórmulas empíricas: Buscam estabelecer uma relação matemática entre a vazão de pico e características físicas da bacia e/ou fatores climáticos. Dentre as formulações existentes pode-se destacar a fórmula de Creager, de Horton e a fórmula de Fuller.

- **Método Racional:** Método simplista que se resume ao emprego da Fórmula Racional, que traduz a concepção básica de que a vazão máxima provocada por uma chuva de intensidade uniforme ocorre quando todas as partes da bacia passam a contribuir para a seção de drenagem. Neste método ignora-se a complexidade real do processamento do deflúvio, não considerando aspectos como o armazenamento de água na bacia e as variações de intensidade e do coeficiente de deflúvio ao longo do período de precipitação. A imprecisão do método será tanto maior quanto maior for a área da bacia avaliada. Por isso, limita-se o método a áreas inferiores a 5 km². Entretanto, devido à sua facilidade de aplicação e à facilidade no conhecimento dos fatores a serem considerados nos estudos, seu uso tem sido bastante difundido para estudo de cheias em pequenas bacias hidrográficas.
- **Método do hidrograma unitário:** Consiste em um hidrograma de escoamento superficial direto onde a área sob a curva corresponde a um volume unitário de escoamento superficial direto, resultante de uma chuva efetiva com intensidade e duração unitárias. É um modelo baseado em conceitos lineares, ou seja, suposições simplificadoras de que a bacia se comporta como um sistema linear e invariante no tempo e, conseqüentemente, permitindo uma avaliação de uma resposta constante.
- **Simulação hidrológica por modelos conceituais:** Processo de modelagem baseado no entendimento conceitual do ciclo hidrológico, com a utilização de funções empíricas para representação de alguns dos processos envolvidos, considerando aspectos como a variabilidade espacial e temporal da área avaliada.

Canholi (2014) destaca a importância dos modelos computacionais para a simulação hidrológica e hidrodinâmica na drenagem urbana, uma vez os pacotes computacionais oferecem uma gama maior de opções de modelos conceituais para simulação dos diversos processos envolvidos na drenagem, permitindo uma maior flexibilidade na modelagem, além de maior aplicabilidade dos modelos às diversas situações de projeto que possam se apresentar.

3.3 USO DE MODELOS COMPUTACIONAIS NA DRENAGEM URBANA

O estudo de bacias urbanas ganhou maior importância em função da necessidade do desenvolvimento de técnicas que minimizem os problemas gerados pelo crescimento acelerado e pela falta de planejamento urbano, características de grande parte das cidades brasileiras. Neste contexto, a modelagem surge como uma ferramenta para avaliação das respostas hidrológicas e hidráulicas das bacias, dadas variações no uso e ocupação do solo, para análise de implantação de obras hidráulicas, dentre outras (GARCIA, 2005).

Christofolletti (1999) definiu modelo como qualquer representação simplificada da realidade ou de um aspecto do mundo real que possibilite a previsão de um comportamento, uma transformação ou ainda uma evolução. Assim, o objetivo da modelagem é a representação da realidade, para entendê-la e prevê-la.

Para Tucci (2005), o modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas dadas diferentes entradas.

Graciosa (2010), por sua vez, define modelo como uma representação física ou matemática de realidade. Segundo a autora, o modelo busca reproduzir o comportamento de um sistema com o objetivo de prever a sua resposta para uma dada entrada, considerando um estado inicial específico, possibilitando a análise de cenários e o estudo de alternativas para o gerenciamento do sistema.

Conforme registrado por Janzen (2007), os modelos são usualmente classificados em físicos, analógicos e matemáticos. Os modelos físicos representam o sistema por meio de um protótipo em escala reduzida. Os modelos analógicos são baseados nas analogias entre os processos físicos, auxiliando na compreensão do fenômeno estudado. Os modelos matemáticos, por fim, representam a natureza do sistema por meio de equações matemáticas; por isso são facilmente modificáveis, representando resultados para diversos cenários ou ainda sistemas com uma grande velocidade de resposta.

Os modelos matemáticos usualmente empregados em Engenharia de Recursos Hídricos podem ser classificados segundo os seguintes critérios (GONTIJO, 2007): quanto à forma de apresentação dos dados (discretos ou contínuos);

quanto à concentração espacial dos processos hidrológicos (concentrados ou distribuídos); quanto ao tipo de relação entre as variáveis (empíricos ou conceituais) e; quanto ao tipo de variáveis utilizadas nas modelagens (estocásticos ou determinísticos). O Quadro 1 apresenta uma breve descrição destes critérios de classificação.

Quadro 1 – Descrição dos critérios de classificação dos modelos matemáticos

Categoria	Descrição
Discreto ou Contínuo	Um modelo é contínuo quando os fenômenos representados são contínuos no tempo, e discreto em caso contrário. A maioria dos sistemas hidrológicos é contínuo, porém são representados por modelos discretos. Esta distinção se aplica essencialmente nos processos de escoamento superficial da bacia. Um modelo discreto simula um único evento de chuva, cuja duração pode variar de algumas horas a alguns dias. Um modelo contínuo simula um período mais longo, prevendo o comportamento da bacia tanto durante a chuva como entre os eventos de precipitação.
Concentrado ou Distribuído	Um modelo é concentrado quando não considera a variabilidade espacial (representada então por um único valor médio) e utiliza somente o tempo como variável independente. É aplicado em bacias pequenas, onde a distribuição espacial das variáveis não compromete os resultados do estudo. Um modelo é distribuído quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou do tempo.
Empírico ou Conceitual	Modelo conceitual é aquele cujas funções utilizadas em sua elaboração consideraram formulações físicas parametrizáveis e/ou empíricas e, assim, pelo menos um parâmetro exige calibração. Os modelos empíricos são aqueles que ajustam valores calculados aos dados observados através de funções que não tem relação com os processos físicos envolvidos. São úteis e simples, porém, pouco robustos, pois são específicos para a situação em que foram aferidos.
Determinístico ou Estocástico	Se a chance de ocorrência das variáveis é considerada e o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo, o processo e o modelo são ditos estocásticos (variáveis aleatórias). Por outro lado, se a probabilidade de ocorrência das variáveis envolvidas no processo é ignorada, o modelo e o processo são ditos determinísticos.

Fonte: Adaptado de USACE (2000).

Gontijo (2007) destacou ainda que os principais tipos de modelos usados em problemas relacionados ao gerenciamento de recursos hídricos são diferenciados de acordo com os processos físicos representados. Assim, os modelos matemáticos podem ainda ser divididos em três grupos: hidrodinâmicos, de

qualidade da água e hidrológicos. Neste último grupo, merecem destaque os modelos do tipo chuva-vazão, que tratam da conversão da chuva em escoamento superficial, os quais serão objeto deste estudo.

Righetto *et al.* (2009), por sua vez, destacaram que os modelos de drenagem buscam a representação do escoamento da precipitação pela superfície do terreno, assim como da interceptação, infiltração, evapotranspiração e da interação destes processos com a rede de drenagem de águas pluviais, possibilitando a demarcação de áreas inundáveis e o uso de ferramentas para análise estatística dos resultados e de apresentação de mapas, servindo assim como subsidio para o planejamento e gestão da drenagem.

A necessidade de projetos de drenagem urbana bem planejados, que possibilitem o desenvolvimento urbano das áreas ocupadas de maneira sustentável, requer o estudo de medidas que conduzam ao planejamento do uso do solo, às condições de urbanização e à impermeabilização do solo em cada bacia, considerando a influência das intervenções e modificações ocorridas. Atualmente, muitos modelos computacionais estão disponíveis na forma de pacotes comerciais para o planejamento e gerenciamento da drenagem urbana. Estes modelos computacionais são muito úteis em diversas situações relacionadas com a gestão de águas pluviais urbanas, podendo ser utilizados na fase de planejamento e detalhamento de projetos, para manutenção corretiva, no caso de necessidade de obras de redimensionamento ou, ainda, para simulação de cenários sobre o comportamento de um sistema de drenagem submetido a determinadas condições de precipitação (RIGHETTO *et al.*, 2009).

Nesse contexto, os modelos computacionais promovem uma análise abrangente nos vários campos da drenagem urbana, integrando a modelagem do escoamento superficial, a propagação em redes de condutos e canais, a simulação da qualidade da água, a operação de sistemas com bombas, vertedores e orifícios, bacias de retenção, o transporte de sedimentos, medidas de controle do escoamento, a demarcação de áreas inundáveis, assim como possibilitam o uso de ferramentas para análise estatística dos resultados obtidos e também a representação dos resultados através de mapas temáticos (YAN *et al.*, 2013; CABRAL *et al.*, 2009).

Os modelos desenvolvidos para simulação da drenagem urbana, em geral, incluem dois componentes sequencialmente conectados: um modelo hidrológico, para transformação da precipitação em escoamento superficial e estimativa das vazões de cheia, denominado modelo chuva-vazão, e um modelo hidráulico, de propagação do escoamento em redes de condutos e canais, possibilitando a identificação das possíveis áreas de inundação na bacia hidrográfica (GRACIOSA, 2010).

Os modelos hidrológicos descrevem os processos de transformação da precipitação em escoamento superficial através de algoritmos de perdas por armazenamento em depressões, interceptação, perdas por infiltração e de propagação na superfície. Os modelos de propagação, por sua vez, representam o movimento da água pela rede de condutos e canais. Normalmente esses modelos utilizam as equações de Saint Venant em sua forma completa, e são denominados modelos hidrodinâmicos (MELLER, PAIVA, 2007).

No presente estudo é realizada uma análise comparativa entre os modelos HEC-HMS e SWMM, ambos modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão. Na seção subsequente, após uma breve descrição acerca dos modelos hidrológicos e de sua importância para a gestão e planejamento da drenagem urbana, os modelos HEC-HMS e SWMM são apresentados, indicando-se diferentes exemplos de suas aplicações.

3.4 MODELOS HIDROLÓGICOS

Os modelos hidrológicos visam representar a parte terrestre do ciclo hidrológico, transformando a precipitação que cai sobre a bacia em vazão para uma determinada seção do curso d'água. Inicialmente, este conhecimento foi fragmentado pela análise de cada um dos processos hidrológicos separadamente, como a avaliação da precipitação, interceptação vegetal, evapotranspiração, infiltração e percolação, balanço hídrico nas camadas superior e inferior do solo e os escoamentos superficial, sub-superficial, subterrâneo e em rios, canais e lagos. Os modelos vieram para integrar todos estes processos de forma a se obter variáveis intermediárias e de saída da bacia, como a vazão (TUCCI, 2010).

Assim, os modelos hidrológicos são aqueles que descrevem os processos envolvidos nas transformações dos eventos de precipitação em vazão por meio de algoritmos de perdas por armazenamento por depressões, interceptação, perdas por infiltração e de propagação na superfície, fundamentais para a realização de projetos, o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos (HOLANDA *et al.*, 2015; HUNUKUMBURA *et al.*, 2011; BOULOMVTIS, 2011; KANG; MERWADE, 2011; MELLER; DE PAIVA, 2007).

De acordo com o disposto por Holanda *et al.* (2015), a utilização de modelos hidrológicos proporciona redução de custos e economia de tempo para análise de potenciais impactos decorrentes de alterações antrópicas sobre o regime hídrico de bacias hidrográficas. Os modelos hidrológicos consistem em ferramentas primordiais para avaliação, simulação e previsão dos efeitos acarretados por eventos de chuvas intensas.

Conforme observado por Siqueira *et al.* (2016), a simulação hidrológica pode ser realizada por meio de uma infinidade de modelos matemáticos, que vão desde os modelos estatísticos de regionalização até os modelos baseados nos processos físicos descritos pelas equações completas de Saint Venant.

No entanto, é importante salientar que a simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem permitido o desenvolvimento de um grande número de modelos que diferem entre si em função dos dados utilizados, da discretização de suas propriedades, das formas de representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados. As limitações básicas à aplicação dos modelos hidrológicos são a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos, além da dificuldade de formular matematicamente alguns processos e a simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenômenos. Assim, a seleção do modelo mais adequado depende das características da bacia e do objetivo da previsão hidrológica (WANG *et al.*, 2015; TUCCI, 2005).

De acordo com Haberlandt e Radtke (2014), o uso dos modelos hidrológicos, seja a partir de dados de precipitação observados ou de dados sintéticos, fornece as seguintes vantagens:

- a) Com o emprego da modelagem hidrológica em projetos de drenagem é possível considerar alterações planejadas no uso do solo, modificações no zoneamento urbano, futuras mudanças climáticas ou ainda o impacto da introdução de medidas de proteção contra inundações, cujo efeito não está contido nas inundações históricas observadas;
- b) A modelagem permite obter o hidrograma completo para projetos, usualmente indisponíveis a partir de registros de fluxo de pico e;
- c) A estimativa de fluxos de pico pode ser utilizada para outras bacias com características parecidas, mas com ausência de dados.

De acordo com Halwatura e Najim (2013), o uso de modelos computacionais para simulações hidrológicas tem avançado rapidamente e estes modelos vem se tornando ferramentas essenciais para compreensão da influência antrópica sobre o fluxo de rios e para a concepção ecológica da gestão sustentável dos recursos hídricos.

A despeito da diversidade de modelos hidrológicos disponíveis, as seções subsequentes apresentarão sucintamente os modelos *Storm Water Management Model* (SWMM) e *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), em função da sua aplicação no presente estudo.

3.4.1 O modelo SWMM

O SWMM é um modelo computacional do tipo chuva-vazão desenvolvido pelo *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), comumente aplicado em simulações qualitativas e quantitativas dos processos de escoamento, especialmente em áreas urbanas. Pode ser aplicado em simulações de evento chuvoso único ou para simulações contínuas de longo prazo (RAI, 2016; USEPA, 2012; PARK *et al.*, 2008). De acordo com Huber e Dickinson (1988), o modelo computacional SWMM é classificado como sendo um modelo discreto ou contínuo, concentrado, fisicamente baseado e numérico.

Segundo a USEPA (2012), o SWMM foi desenvolvido em 1971 e, desde então, tem sofrido diversas atualizações. É amplamente utilizado em várias partes do mundo para o planejamento, análises e projetos de sistemas de redes de drenagem de águas pluviais em áreas urbanas e de sistemas coletores de águas

residuárias, sendo suficientemente robusto para aplicações também em áreas rurais.

A partir de dados de precipitação e do sistema de drenagem em estudo, o modelo simula o escoamento superficial resultante, podendo, também, simular a carga de poluentes associada ao escoamento. O Sistema de drenagem pode apresentar condutos, canais abertos, pontos de armazenamento e tratamento, bombas e reguladores, dentre outros dispositivos (USEPA, 2012).

Ao longo de suas simulações, o modelo SWMM aplica os princípios de conservação de massa, energia e momento, sempre que apropriado e de acordo com as opções de modelagem feitas pelo usuário (JAMES *et al.*, 2013; SHINMA, 2011; PARK *et al.*, 2008).

A versão mais atual do modelo (SWMM 5.0) proporciona um ambiente integrado, que permite a entrada de dados para a área de estudo, simulação do comportamento hidrológico e hidráulico, estimativa da qualidade da água e visualização dos resultados da modelagem em uma grande variedade de formatos, como áreas de drenagem codificadas por meio de cores, mapas de sistemas de coletores de água, gráficos e tabelas de séries históricas, diagramas de perfil e análises estatísticas de frequência (USEPA, 2012).

O SWMM representa o comportamento do sistema de drenagem por meio de uma série de fluxos de água e matéria entre os principais componentes descritores do ambiente – atmosférico, superfície do solo, águas subterrâneas e transporte –, assim descritos:

- Atmosférico: módulo a partir do qual ocorre a precipitação e o depósito dos poluentes sobre a superfície do solo, representado através do objeto Pluviômetro.
- Superfície do solo: representado por um ou mais objetos denominados sub-bacia. Estes objetos recebem a precipitação e exportam o fluxo de água por meio de infiltração para o módulo de águas subterrâneas e também por meio do escoamento superficial e carreamento de poluentes, para o módulo de transporte.

- Transporte: composto por uma rede de elementos de transporte (canais, tubulações, bombas) e unidades de armazenamento e tratamento, que transportam a água para os nós exutórios ou para as estações de tratamento. Os fluxos de entrada deste módulo são provenientes do escoamento superficial, das interações com o fluxo subterrâneo, do escoamento de águas residuárias, ou de hidrograma de entrada definido pelo usuário e são modelados por meio dos objetos nó e trecho.

Para uma dada modelagem do SWMM não é necessário que todos os módulos anteriormente descritos sejam considerados.

De acordo com Rossman (2010), a estrutura computacional do modelo SWMM é composta por dez blocos ou módulos, sendo quatro computacionais e cinco de serviço, além do módulo *Executive*, responsável por determinar o ordenamento das simulações. A Figura 1 apresenta os blocos componentes do modelo SWMM e suas relações.

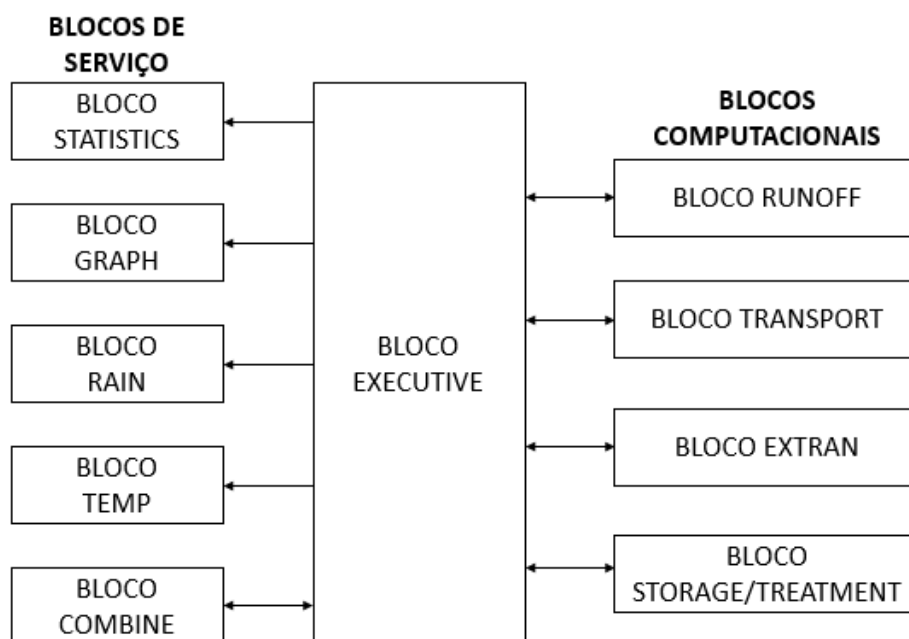


Figura 1 - Blocos componentes no modelo SWMM e suas relações

Fonte: Adaptado de Huber e Dickinson (1988)

Os módulos computacionais desenvolvem as principais rotinas de cálculo, responsáveis pelas transformações hidrológicas e qualitativas no sistema e são assim definidos:

- **Runoff:** Responsável pelas transformações chuva-vazão, ou seja, pela geração do escoamento superficial;
- **Transport:** Responsável pela propagação do escoamento, poluentes/efluentes e sedimentos através da rede de drenagem;
- **Extran:** Responsável pela modelagem hidrodinâmica em condutos e canais componentes das redes de drenagem e;
- **Storage/Treatment:** Responsável pela modelagem qualitativa do tratamento e armazenamento da água e poluentes/efluentes.

O bloco “*runoff*” (bloco mais relevante para a condução deste estudo) gera hidrogramas a partir de dados meteorológicos e de um conjunto de parâmetros que descrevem as características fisiográficas e hidrológicas da bacia, estimando as vazões máximas e o escoamento superficial resultante de eventos de precipitação na área estudada.

Os módulos de serviço, por sua vez, são responsáveis por auxiliar as rotinas de cálculo desenvolvidas nos módulos computacionais e são descritas da seguinte forma:

- **Statistics:** Realiza as análises estatísticas dos dados modelados;
- **Graph:** Possibilita a apresentação dos dados de saída em forma de gráfico;
- **Combine:** Permite a combinação dos arquivos gerados em interface, ampliando a capacidade de modelagem do sistema;
- **Rain:** Responsável pela leitura e análise dos dados de precipitação, gerando arquivos de interface para entrada no bloco runoff;
- **Temperature:** Para verificação dos dados de entrada de temperatura, evaporação e velocidade do vento.

O modelo SWMM é composto por objetos físicos, organizados para formar o sistema de drenagem, e virtuais, para descrição de cada processo envolvido nas simulações, assim como das características adicionais dentro de uma área de estudo.

Os objetos físicos são compostos pelos seguintes elementos: Sub-bacia, conduto, nó exutório e de conexão, pluviômetro, divisor de fluxo, regulador de vazão, unidade de armazenamento e bomba.

Os objetos virtuais, por sua vez, são compostos por: Climatologia, acumulação de neve, aquífero, hidrograma unitário, seção transversal irregular, contribuições externas de vazão, regras de controle, agentes poluentes, usos do solo, tratamento, curvas, série temporal, padrões temporais e controles por dispositivos de baixo impacto (LID).

A escolha dos objetos a serem utilizados nas simulações dependerá das finalidades de cada simulação (USEPA, 2012).

3.4.1.1 Modelo de bacia

O modelo computacional SWMM permite ao usuário a divisão da área de estudo em um número adequado de sub-bacias e a identificação do ponto de descarga de cada uma delas, podendo ser o nó exutório, ou ainda outras sub-bacias.

O SWMM considera cada sub-bacia como um elemento ideal, de formato retangular, onde o escoamento superficial converge para um elemento de drenagem central.

Nas simulações hidrológicas realizadas no SWMM alguns parâmetros devem ser considerados. As sub-bacias podem ser divididas em subáreas permeáveis e impermeáveis. O escoamento superficial pode se infiltrar na camada superior do solo das subáreas permeáveis, mas não através das subáreas impermeáveis. As áreas impermeáveis podem ainda ser subdivididas em áreas que contem armazenamento em depressão e sem armazenamento. O escoamento superficial em uma subárea da sub-bacia pode fluir para outra subárea ou ambas subáreas podem drenar diretamente para a saída da sub-bacia. Podem ser ainda definidas as condições de infiltração e o transporte e acúmulo de poluentes nas sub-bacias.

Segundo USEPA (2012), os outros parâmetros principais para descrição das características das sub-bacias a serem fornecidos pelo usuário são:

- Pluviômetro atribuído à sub-bacia;
- Nó exutório ou sub-bacia onde esta descarrega;
- Uso e ocupação do solo atribuídos;
- Área da sub-bacia;
- Porcentagem de área impermeável;

- Declividade média da sub-bacia;
- Largura Característica do fluxo superficial;
- Coeficiente de Manning “ η ” para o fluxo superficial para áreas permeáveis e impermeáveis;
- Armazenamento em depressão para áreas permeáveis e impermeáveis e;
- Porcentagem de solo impermeável isenta de armazenamento em depressão.

Os processos de maior interesse para o presente estudo, em função de sua avaliação comparativa com o modelo HEC-HMS, são o escoamento superficial e a infiltração, processos que serão brevemente descritos nos parágrafos subsequentes.

- *Escoamento superficial*

O escoamento superficial é a vazão que escoar sobre a superfície do terreno como resultado direto da precipitação efetiva. No SWMM, considera-se que, para a formação do escoamento superficial, a superfície da sub-bacia é tratada como um reservatório não-linear. As entradas de vazão resultam da precipitação e de possíveis afluições provenientes de outras subáreas de montante. As saídas de vazão, por sua vez, são compostas pela infiltração, evaporação e pelo escoamento superficial. A capacidade do “reservatório” é correspondente à capacidade de armazenamento máxima em depressões, resultante de alagamentos, umidificações e intercepções.

- *Infiltração*

A infiltração é o processo de penetração da chuva pela superfície do solo até atingir a zona não-saturada das áreas permeáveis. O SWMM apresenta três métodos para modelagem da infiltração: *Horton*, *Green-Ampt* e *Curve Number do SCS*.

O método *Curve Number* do SCS – método selecionado neste trabalho para a simulação do processo de infiltração, por também estar disponível no HEC-HMS – é uma aproximação adotada a partir do denominado Número da Curva (CN), desenvolvida pelo *National Resources Conservation Service* (NRCS) para estimativa do escoamento superficial. Neste método, considera-se que a

capacidade de infiltração total pode ser estimada a partir do CN, tabelado de acordo com o tipo de cobertura e grupo hidrológico do solo e pela condição anterior de umidade do mesmo. Durante um evento de chuva, a capacidade de infiltração é deplecionada em função da precipitação acumulada e da capacidade de infiltração remanescente. Os parâmetros de entrada do método são: CN e o tempo que o solo leva para ir de completamente saturado a completamente seco.

O cálculo da precipitação efetiva é conduzido com auxílio da equação (01).

$$Pe = \frac{(P-Ia)^2}{P-Ia+S} \quad (01)$$

Na equação (01):

- Pe: Precipitação efetiva acumulada, em mm;
- P: Precipitação acumulada, em mm;
- Ia: Perda inicial, em mm e;
- S: Retenção potencial máxima, em mm.

A perda inicial representa as perdas por armazenamento. Somente após o preenchimento dessa parcela é que pode haver escoamento superficial. O método sugere que Ia seja uma parcela de S, conforme expresso na equação (02).

$$Ia = 0,2.S \quad (02)$$

A retenção potencial máxima (S) é a capacidade máxima de armazenamento da bacia. É função do número da curva (CN), estimada a partir do emprego da equação (03).

$$S = \frac{25400-254.CN}{CN} \quad (03)$$

Na equação (03):

- S: Retenção potencial máxima, em mm, e;
- CN: Número de deflúvio, adimensional.

3.4.1.2 Aplicações do modelo SWMM

Gomes e Paiva (2010) utilizaram o modelo computacional SWMM para avaliação dos processos de acumulação e transporte de sedimentos em uma pequena parcela urbanizada da bacia do Arroio Cancela, em Santa Maria, Rio Grande do Sul. As simulações foram realizadas nos módulos *runoff* e *transport* e utilizaram como entradas dados de vazão, precipitação e sedimento disponíveis para a área. A partir das análises foi possível observar que a carga poluidora lançada no corpo receptor varia muito (de 3,5 a 6205 mg/L) e depende de aspectos como intensidade da chuva, duração do evento, tamanho da área de contribuição e outros fatores que dificultam o estabelecimento da relação vazão/carga poluidora.

Shuster e Pappas (2011) aplicaram o modelo computacional SWMM para estimativa de hidrogramas de escoamento para números da curva (CN) experimentais, em Indiana, nos Estados Unidos. As simulações de infiltração e escoamento apresentaram respostas com boa correlação com as informações observadas.

Ouyang *et al.* (2012) aplicaram o modelo SWMM para modelagem dos efeitos qualitativos e quantitativos de superfícies com diversas taxas de impermeabilização sobre o escoamento superficial em superfícies na cidade de Pequim, para eventos de chuva intensa. Os resultados do estudo indicaram a capacidade de expressar em detalhe os padrões quantitativos e qualitativos das águas pluviais e demonstraram que o ajuste da taxa de impermeabilização tem o potencial de reduzir o pico do escoamento e da carga de poluição.

Souza *et al.* (2012) analisaram comparativamente os modelos SWMM e HEC-HMS para simulação do processo de escoamento superficial na bacia do córrego Samambaia, localizado em Goiânia (GO), para precipitação com período de recorrência de 5 anos. Os modelos apresentaram resultados similares para o evento de chuva de projeto, com maior pico de vazão para a simulação produzida no modelo SWMM. O tempo de pico no HEC-HMS apresentou defasagem com relação ao tempo de pico do modelo SWMM. Por fim, os volumes escoados pelos dois modelos apresentaram variações pouco significativas.

Pawar *et al.* (2013) aplicaram o SWMM para modelagem do tipo chuva-vazão e compararam as respostas do modelo com aquelas obtidas a partir do uso da técnica *Fuzzy* na bacia do rio Godovary, uma bacia de pequeno porte, localizada em Maharashtra, Índia. Os valores obtidos para calibração e validação do modelo apresentaram-se dentro de limites aceitáveis. O desempenho do modelo revelou sua capacidade para previsão de vazões de pico com precisão adequada.

Ortiz e Muñoz (2013) aplicaram o modelo SWMM para modelagem do sistema de drenagem de águas pluviais e de esgoto urbano na área urbana de Copacopa, Venezuela. Os estudos indicaram a viabilidade e eficiência do modelo SWMM para aplicação em projetos de engenharia uma vez que possibilita uma análise mais precisa do comportamento hidráulico do sistema de drenagem, permitindo, também, análises de diversos cenários, a identificação de problemas e a avaliação de melhorias a serem aplicadas no sistema.

Faria *et al.* (2014) utilizaram o modelo SWMM como ferramenta de simulação hidrológica da bacia do córrego Barbado, em Cuiabá (MT) para avaliação das respostas dadas diferentes cenários de impermeabilização do solo da bacia em estudo. Observou-se uma tendência de crescimento de 17% a 22% na vazão de pico obtida para período de retorno de 2 anos, quando o cenário atual passa a ser substituído por outros cenários onde os lotes vários são ocupados, com conseqüente aumento na taxa de impermeabilização do solo. Estes percentuais de crescimento decresceram com o aumento do período de retorno, uma vez que as perdas iniciais tornam-se relativamente menores que as alturas precipitadas.

Krebs *et al.* (2014) aplicaram o modelo SWMM para avaliação do desempenho de ferramentas de baixo impacto (LID) em bacias urbanas (com diferentes graus de urbanização) e não urbanas, com diferentes tamanhos de bacia no distrito de Guang-Ming, na China, analisando como os efeitos da redução na resolução espacial afetam a aplicabilidade do modelo. Os resultados do estudo indicaram que o modelo SWMM apresenta bom desempenho para as simulações em bacias de pequeno a grande porte, mas ressaltaram a necessidade de regionalização de parâmetros requeridos pelo modelo, uma vez que a redução da resolução espacial produz alterações no pico do escoamento resultante, que é superestimado.

Walsh *et al.* (2014) utilizaram o modelo SWMM como ferramenta para avaliação do impacto da implantação de reservatórios de captação de água pluviais residenciais na bacia de Chollas Creek, situada em uma região semi-árida dos Estados Unidos. Os estudos mostraram que a implantação dos reservatórios reduziu o volume de escoamento superficial entre 10 e 12% para todos os períodos de retorno. Indicaram, ainda, o potencial de aproveitamento das águas pluviais da bacia avaliada.

Vinagre *et al.* (2015) aplicaram o SWMM para avaliação do comportamento do sistema de drenagem da bacia do rio Pacacuri, em Belém, para dois diferentes cenários dada uma chuva de projeto de 82 mm. O primeiro cenário consistiu no canal projetado, em perfeitas condições, não permitindo a ocorrência de alagamentos. O segundo, por sua vez, simulou o mesmo canal com assoreamento de 50 cm, produzindo inundações. Os autores destacaram, ainda, a importante contribuição do modelo computacional SWMM como ferramenta para possibilitar medidas de prevenção e controle de alagamentos e inundações em áreas urbanizadas.

Ghodsí *et al.* (2016) utilizaram o SWMM como ferramenta computacional para avaliação quantitativa e qualitativa do escoamento superficial. As simulações produzidas foram utilizadas na avaliação de modelos de gestão urbana voltados para o controle e melhoria das condições das águas urbanas da bacia do rio Velenjak, na área urbana de Teerã, Irã. Os resultados indicaram que a escolha do modelo de gestão mais adequado depende das particularidades da área avaliada e da disponibilidade dos recursos locais.

3.4.2 Modelo HEC-HMS

O modelo HEC-HMS foi criado pelo Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos como ferramenta de simulação hidrológica dos processos de transformação de chuva em vazão em bacias hidrográficas dendríticas, no qual a bacia é discretizada em sub-bacias. O modelo possibilita a estimativa do escoamento superficial por meio de modelos tradicionalmente utilizados em

hidrologia, com vistas ao planejamento e gestão da drenagem urbana (USACE, 2010).

O HEC-HMS foi desenvolvido para possibilitar a representação de bacias hidrográficas com características distintas, permitindo sua aplicação em uma grande variedade de áreas geográficas. O modelo HEC-HMS permite aplicações em estudos que envolvem disponibilidade hídrica de bacias hidrográficas, modelagem de inundação e escoamento superficial em bacias urbanizadas e rurais (KAMALI *et al.*, 2013; GRACIOSA, 2010; YI, 2011).

O modelo também simula os processos de translação dos hidrogramas de cheia nos elementos hidrológicos e hidráulicos que compõem as bacias, como junções, sub-bacias, propagações, dentre outros. Os hidrogramas produzidos pelo HEC-HMS são utilizados diretamente ou em conjunto com o *software Hydrologic Engineering Center – River Analysis System* (HEC-RAS), também desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos, em estudos de disponibilidade hídrica, previsão de fluxo, previsão do impacto de urbanizações futuras, análise de reservatórios, controle de danos provocados por inundações, regulação de áreas de várzea e operação de sistemas (USACE, 2010).

Sua interface gráfica permite uma integração “amigável” com o usuário, aspecto característico dos diversos componentes do programa e, principalmente, das etapas de representação esquemática da bacia hidrográfica, entrada de dados e visualização dos resultados (COSTA, 2013).

O modelo computacional HEC-HMS é um modelo matemático discreto, concentrado, empírico/conceitual e determinístico (HUBER; DICKINSON, 1988). Diferente do modelo SWMM, o HEC-HMS é um modelo exclusivamente do tipo chuva-vazão.

A estrutura do modelo computacional HEC-HMS é formada por três componentes principais: o modelo de bacia, o modelo meteorológico e as especificações de controle. As simulações realizadas no HEC-HMS calculam a resposta do tipo chuva-vazão no modelo de bacia, dada uma entrada de precipitação no modelo meteorológico. As especificações de controle definem o período e o passo de tempo das simulações. Os dados de entrada, tais como dados de série histórica,

dados emparelhados ou dados em grade são geralmente requeridos como parâmetros ou condições de contorno para os modelos de bacia e meteorológico.

- *Modelo de bacia*

O modelo de bacia é o principal componente do HEC-HMS, nele estão contidos os parâmetros necessários para representação da bacia hidrográfica, assim como dos processos que nela ocorrem. O HEC-HMS representa fisicamente a bacia utilizando as características dos seguintes elementos hidrológicos: sub-bacias, rios, reservatórios, fontes, sumidouros, junções, depressões e derivações. Estes elementos hidrológicos são conectados criando uma rede que representará o processo de escoamento na bacia de estudo.

No caso do elemento sub-bacia, muitos modelos matemáticos estão disponíveis para determinar as perdas por precipitação, transformando o excesso de precipitação em fluxo na saída da sub-bacia e adicionando o fluxo base. Nos parágrafos e itens subseqüentes os diferentes modelos matemáticos serão referenciados como métodos.

Uma vez determinados os elementos físicos da bacia, são então determinados, para cada elemento sub-bacia, os métodos de cálculo das perdas das precipitações, da transformação do excesso de precipitação em escoamento superficial na saída da sub-bacia e também sua composição com o escoamento de base. No elemento curso d'água são determinados os métodos de cálculo da propagação do escoamento e de perdas ou ganhos. Para cada escolha, são considerados os parâmetros associados a tais métodos, como área das sub-bacias, tempo de concentração, perdas por evapotranspiração, perdas por infiltração e perdas em sumidouros.

O HEC-HMS é um modelo que inclui uma grande variedade de métodos para representação do comportamento hidrológico de bacias e canais, uns de formulação mais simples e outros de formulação mais complexa. Existe, portanto, uma grande diversidade de possibilidades para se representar os fenômenos de perdas e transformações. O Quadro 2 reúne as alternativas disponíveis no HEC-HMS para simulação das perdas por infiltração, escoamento de base e escoamento direto.

USACE (2013) oferece uma detalhada discussão acerca das diferentes alternativas de modelagem reunidas no Quadro 2, sintetizando as aplicações e limitações inerentes a cada método, além de uma abrangente descrição das variáveis e parâmetros de entrada requeridos.

Quadro 2- Opções de modelagem disponíveis no HEC-HMS

Elemento hidrológico	Tipo de cálculo	Métodos disponíveis
Sub-bacia	Perdas por infiltração	Inicial e taxa constante Déficit e taxa constante (DC) SCS Curve Number (SCS CN) Green e Ampt Soil moisture accounting (SMA) Exponencial
	Escoamento superficial	Hidrógrafa unitária de Clark Onda cinemática ModClark Hidrógrafa unitária SCS Hidrógrafa unitária de Snyder Hidrógrafa unitária definida pelo usuário
	Escoamento de base	Recessão limitada Constante mensal Reservatório linear Boussinesq não-linear Recessão
	Interceptação vegetal	Interceptação simplificada em rede Interceptação simples
	Acumulação em depressão	Acumulação simplificada em rede Acumulação simples

Fonte: USACE (2013).

O HEC-HMS faculta ao usuário a escolha de determinados processos na simulação hidrológica da bacia. No presente estudo, para as estimativas de vazão, foram consideradas exclusivamente as perdas por infiltração e os processos de geração do escoamento superficial. Como serão utilizados os

mesmos métodos escolhidos para aplicação do SWMM, buscando-se uma análise comparativa direta entre os modelos HEC-HMS e SWMM, os itens subsequentes apresentarão alternativas para estimativa do escoamento superficial e das perdas por infiltração.

- *Escoamento superficial*

O modelo HEC-HMS possui cinco métodos para transformação da precipitação em escoamento superficial: Hidrograma Unitário de *Clark*, Hidrograma Unitário de *Snyder*, hidrograma unitário SCS, *ModClark* e Onda Cinemática. Neste estudo, optou-se pela utilização do método do hidrograma unitário SCS para obtenção do escoamento superficial.

O Hidrograma Unitário é um hidrograma adimensional, formado a partir da vazão de pico e do tempo de ascensão do hidrograma. No método Hidrograma Unitário SCS, a vazão de pico é estimada por meio da equação (04).

$$Q_p = \frac{P_e \cdot A}{4,8 \cdot T_p} \quad (04)$$

Na Equação (04):

- Q_p : Vazão de pico unitária, em m³/s;
- P_e : Precipitação efetiva unitária, em mm;
- A : Área da bacia, em km² e;
- T_p : Tempo de pico, em horas.

O Tempo de ascensão ou de pico é o tempo que decorre do início da precipitação efetiva até o pico do hidrograma, definido por meio da equação (05).

$$T_p = \frac{T_d}{2} + \text{lag} \quad (05)$$

Na Equação (05):

- T_d : Tempo de duração da precipitação efetiva, em min, e;
- Lag : Tempo de retardo, em min.

O tempo de retardo, por sua vez, representa a resposta da bacia ao evento de chuva. Por definição é o intervalo entre o centróide da precipitação efetiva até o

pico da vazão do hidrograma. O SCS sugere a seguinte relação para sua obtenção:

$$\text{lag} = 0,6 \cdot T_c \quad (06)$$

Na Equação (06) T_c representa o tempo de concentração da bacia, em minutos.

- *Infiltração*

O modelo HEC-HMS apresenta os seguintes métodos para determinação das perdas por infiltração: Inicial e taxa constante, déficit e taxa constante (DC), SCS *Curve Number* (SCS CN), Green e Ampt, exponencial e *Soil moisture accounting* (SMA).

Assim como na aplicação do SWMM, optou-se pela aplicação do método SCS *Curve Number* para o cálculo das perdas por infiltração. O método SCS *Curve Number* foi previamente descrito na seção 3.4.1.1.

3.4.2.1 Modelo meteorológico

O modelo meteorológico, por sua vez, é responsável pela representação dos fenômenos meteorológicos que ocorrem na bacia, tais como precipitação, radiação solar e evapotranspiração. No modelo meteorológico são especificadas as formas e métodos de entrada de dados de precipitação na forma de chuva e/ou derretimento de neve e ainda os dados referentes aos processos de evapotranspiração. Segundo Souza *et al.* (2012), usualmente apenas o processo de precipitação é considerado, uma vez que a evapotranspiração pode ser insignificante para simulação de precipitações de curta duração.

Para representar o fenômeno de precipitação, o programa HEC-HMS oferece alternativas que visam prover aos usuários diversas formas de representar o comportamento das chuvas na bacia em estudo. Essas alternativas são brevemente apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Opções de modelagem de precipitação disponíveis no HEC-HMS

Métodos disponíveis	Descrição
Precipitação associada à frequência	Usado para desenvolver um evento de precipitação onde as alturas de precipitação para várias durações dentro da chuva de projeto têm uma probabilidade de superação consistente

Pluviômetro ponderado	Aplica pesos específicos para os pluviômetros de acordo com as escolhas do usuário
Precipitação em rede	Permite o uso de dados de precipitação em rede, como os produzidos por RADAR
Distância inversa	Calcula a precipitação média da sub-bacia aplicando uma ponderação ao quadrado inverso à medida de precipitação definida pelo usuário
Precipitação SCS	Aplica uma distribuição de tempo baseada no Método SCS especificada pelo usuário a uma altura de precipitação total de 24 horas
Hietograma especificado pelo usuário	Aplica um hietograma especificado pelo usuário para cada elemento de sub-bacia
Precipitação padrão de projeto	Aplica uma distribuição de tempo a um índice de altura de precipitação
HMR 52	Usado para desenvolver uma Precipitação Máxima Provável, conforme HMR 52

Fonte: USACE (2013).

3.4.2.2 Especificações de controle

As especificações de controle consistem no componente de controle das simulações, onde são determinados os intervalos de duração das simulações, com determinação pelo usuário da data e hora de início e fim das simulações e também dos passos de tempo utilizados nas análises.

3.4.2.3 Aplicações

Tahmasbinejad *et al.* (2012) aplicaram o modelo computacional HEC-HMS em conjunto com o HEC-RAS para delimitação de áreas de inundação na bacia do rio Karum, no Irã. No estudo, o HEC-HMS foi utilizado como ferramenta de simulação hidrológica para estimativa das transformações de precipitação em escoamento superficial e vazão de pico no rio Karum. Os dados produzidos foram utilizados para definição de medidas de gestão de águas pluviais na área urbanizada da bacia do rio Karum, buscando controlar ou minimizar os efeitos das enchentes que frequentemente ocorrem na região. Segundo os referidos autores, os modelos apresentaram-se consistentes, representando a dinâmica dos cursos d'água de forma adequada.

Meenu *et al.* (2013) aplicaram o modelo HEC-HMS para simulação dos impactos das mudanças climáticas sobre a bacia do rio Tunga-Bhadra, na Índia. Os resultados sugerem que o aumento na temperatura provocará aumento na

precipitação e no escoamento superficial e redução das perdas reais de evapotranspiração na bacia estudada

Halwatura e Najin (2013) avaliaram as respostas do modelo HEC-HMS para três métodos de perdas por infiltração diferentes: *Curve number*, Hidrograma Unitário de Snyder e Hidrograma Unitário de Clark. O modelo HEC-HMS para simulação do escoamento superficial foi empregado na bacia do rio Oya, no Sri Lanka. O método do hidrograma unitário de Snyder foi o que se apresentou mais adequado à realidade da área estudada.

Abushandi e Merkel (2013) compararam o uso do modelo HEC-HMS com o modelo IHACRES para simulação de evento único de chuva intensa na árida região de Wadi Dhuliel, na bacia do rio Jordão. Os resultados das simulações indicaram o melhor desempenho do modelo HEC-HMS em relação ao IHACRES para estimativa do escoamento superficial a partir de dados de precipitação.

Gyawali e Watkins (2013) aplicaram o modelo HEC-HMS em três bacias com características climática e de uso e ocupação do solo variadas para avaliação dos efeitos das mudanças climáticas sobre o pico de escoamento superficial. Os resultados indicaram que o modelo HEC-HMS apresenta-se consistente para avaliação dos efeitos do degelo de neve sobre o pico de escoamento superficial da bacia.

Tripathi *et al.* (2014) aplicaram o modelo HEC-HMS para avaliação dos impactos de possíveis modificações no uso e ocupação do solo na região de Vermonia, no Oregon, Estados Unidos, considerando o crescimento urbano da região combinado, ainda, com as alterações climáticas. O estudo utilizou um evento de inundação ocorrido em 2007 na área avaliada como estudo de caso. Os procedimentos de pesquisa incluíram modelagem hidrológica, análise social e análise de cenários. O estudo mostrou-se bem sucedido para avaliação dos impactos provenientes de alterações climáticas e de uso e ocupação do solo na área avaliada, podendo ser replicado em outras áreas como ferramenta de gestão de inundações.

Silva *et al.* (2014) utilizaram o HEC-HMS para avaliação de eventos de chuva intensa da bacia do rio Kenali, no Sri Lanka. Os parâmetros do modelo foram

calibrados para um evento de chuva intensa ocorrido em 2005 e validado para eventos extremos ocorridos em 2008 e 2010. Os autores ressaltaram a capacidade do modelo para simular a magnitude e velocidade dos picos de cheia na bacia do rio Kelani, constituindo uma importante ferramenta para previsão de inundações. O estudo destacou o potencial de aplicação do HEC-HMS como ferramenta útil para mitigação de desastres, controle de enchentes e gestão de águas pluviais em bacias hidrográficas de médio porte em países tropicais.

Laouscheria e Mansouri (2015) aplicaram o modelo HEC-HMS para avaliação dos efeitos das alterações do uso e ocupação do solo decorrentes do processo de urbanização da bacia de contribuição da área urbana de Azzaba, na Argélia. A partir da comparação do modelo HEC-HMS com o modelo WBNM, os autores concluíram que o HEC-HMS apresentou o melhor ajuste para o cenário real.

O modelo computacional HEC-HMS foi utilizado para simular os eventos de cheia ocorridos na bacia do rio Una, Pernambuco, com o objetivo de reconstruir o evento de cheia ocorrido em junho de 2010, em que não houve registro de vazão. O estudo realizado buscou descrever o padrão de ocorrência das inundações mais severas na bacia para, a partir desse padrão, estabelecer cenários que permitissem prever e acompanhar a evolução das inundações na bacia do rio Una (RIBEIRO NETO *et al.*, 2015).

Haile *et al.* (2016) aplicaram o modelo HEC-HMS para avaliar o potencial de aplicação de dados de previsão meteorológica para sistemas de alerta precoce de inundações no rio Benue, Nigéria. Os dados utilizados foram provenientes de produtos de análise de precipitação multi-satélite (TMPA), pós tempo real. Os autores destacaram a problemática da carência de dados confiáveis de precipitação e vazão disponíveis no continente africano e a importância da implementação de alternativas metodológicas que possibilitem a implantação de ações voltadas para o controle e previsão de inundações na área de estudo. Os resultados indicaram que as previsões de precipitação pluviométrica e climáticas de modelos meteorológico tem grande potencial para servir como insumo para modelos de previsão de inundações em tempo real para bacias situadas em áreas com escassez de dados.

Ribeiro Neto *et al.* (2016) utilizaram o modelo HEC-HMS e do HEC-RAS como ferramentas para simulação hidrológica e hidráulica do baixo curso do rio Ipojuca, em Pernambuco. O estudo consistiu no desenvolvimento de metodologia para mapeamento de indicadores de perigo e áreas inundáveis na escala municipal. Como resultado foram gerados seis indicadores de perigo além de metodologia para mapeamento de áreas inundáveis em função do índice topográfico e de matriz de custo de distância.

4 METODOLOGIA

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As diferentes etapas que conformarão a metodologia são apresentadas nas seções subsequentes. Numa primeira etapa, a área de estudo é brevemente descrita. É realizada uma caracterização do município onde a área de estudo está inserida bem como das bacias hidrográficas utilizadas como unidades de análise.

Em seguida, numa segunda seção, são indicadas as fontes das informações fisiográficas e hidrológicas, assim como sua apropriação e manipulação para formação de dados e parâmetros de entrada para os modelos.

A terceira seção foi reservada para apresentação da modelagem hidrológica, composta pela apropriação das equações de chuvas intensas e dos tempos de concentração, construção do hietograma de projeto, determinação de parâmetros e constantes de entrada adicionais inerentes aos modelos objetos de estudo e estimativa das vazões de pico e do escoamento superficial.

4.2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende áreas urbanas e periurbanas de Muniz Freire, município situado ao Sul do estado do Espírito Santo, na microrregião do Caparaó, com uma população de 18.397 (IBGE, 2010) habitantes residentes, em sua maioria, na área rural. O município possui área de 679 km² e está dividido em cinco distritos (Muniz Freire, Itaci, Menino Jesus, Piaçu e São Sebastião). O município está situado a 169 km da capital do estado do Espírito Santo, Vitória, e limita-se ao Norte, com Brejetuba; ao Sul, com Alegre e Ibitirama; a Leste, com Conceição do Castelo e Castelo e a Oeste, com Iúna e Ibatiba. A Figura 2 apresenta a localização do município de Muniz Freire no estado do Espírito Santo.

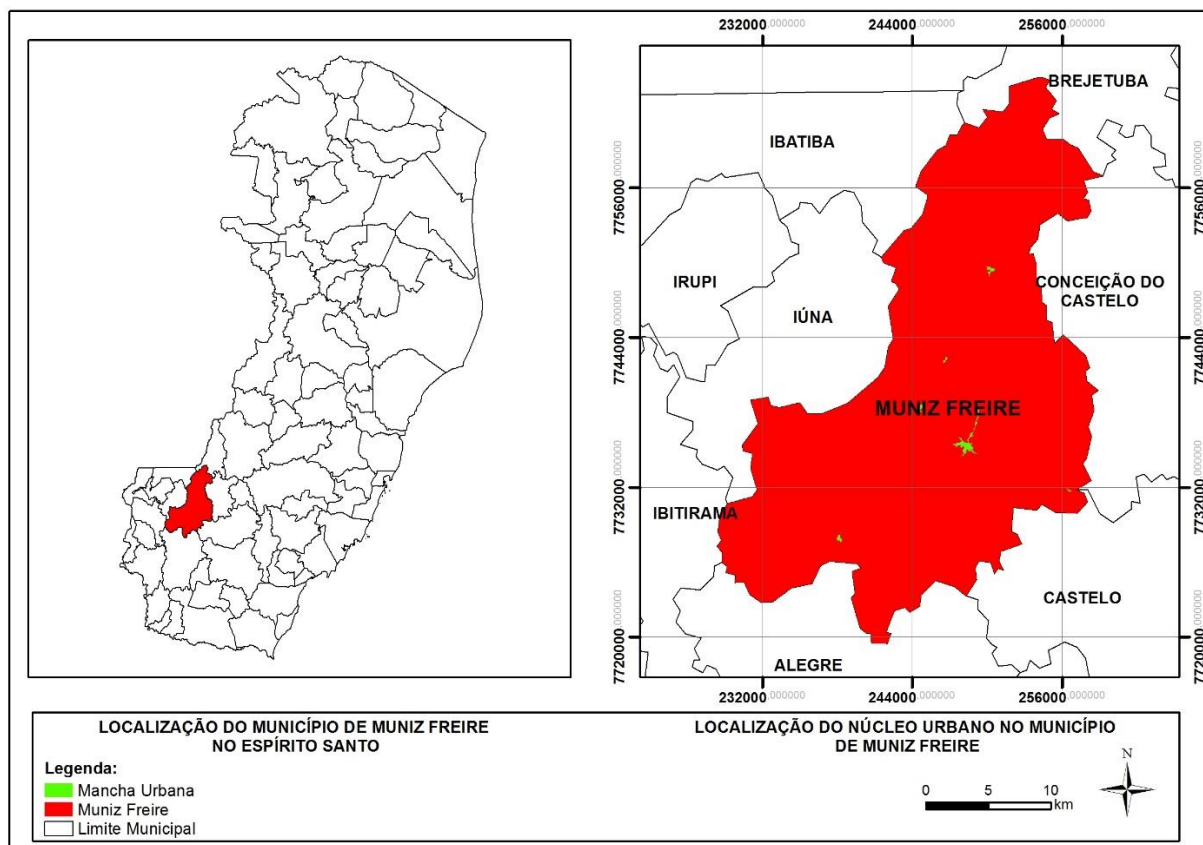


Figura 2 - Localização do município de Muniz Freire no Espírito Santo

O relevo do município varia de fortemente ondulado a montanhoso, com predominância de solos classificados como Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico. A degradação destes solos vem se acentuando devido ao abandono de cultivos de café e à prática de pastagens extensivas sem as devidas medidas conservacionistas, além do uso de tecnologias inadequadas na construção e manutenção de estradas (INCAPER, 2011). A vegetação é composta por Floresta Ombrófila Densa de Montanha, vegetação secundária sem palmeiras, cultivos agrícolas, destacando-se os cultivos de café e hortaliças e as pastagens. (IJSN, 2009). O clima da região onde Muniz Freire está situado é o temperado seco, com pluviosidade média anual de 1.371 mm. As principais atividades econômicas do município são voltadas para a agropecuária, com destaque para os cultivos de café, pastagens extensivas e para o agro e ecoturismo (INCAPER, 2011).

A unidade de análise considerada neste trabalho foi a bacia hidrográfica do ribeirão Vargem Grande, em função de sua influência sobre o núcleo urbano correspondente à sede do município de Muniz Freire.

A bacia do ribeirão Vargem Grande consiste numa bacia de pequeno porte, afluente do rio Braço Norte Esquerdo que, por sua vez, desagua no rio Itapemirim. A bacia do ribeirão Vargem Grande foi selecionada a partir do conjunto de otobacias de nível 6, disponibilizadas no Sistema Integrado de Bases Geospaciais do Estado do Espírito Santo (GEOBASES). A bacia escolhida possui uma área de 35 km² e perímetro de 33 km. Localiza-se na porção mais ao norte de Muniz Freire, como pode ser observado na Figura 3.

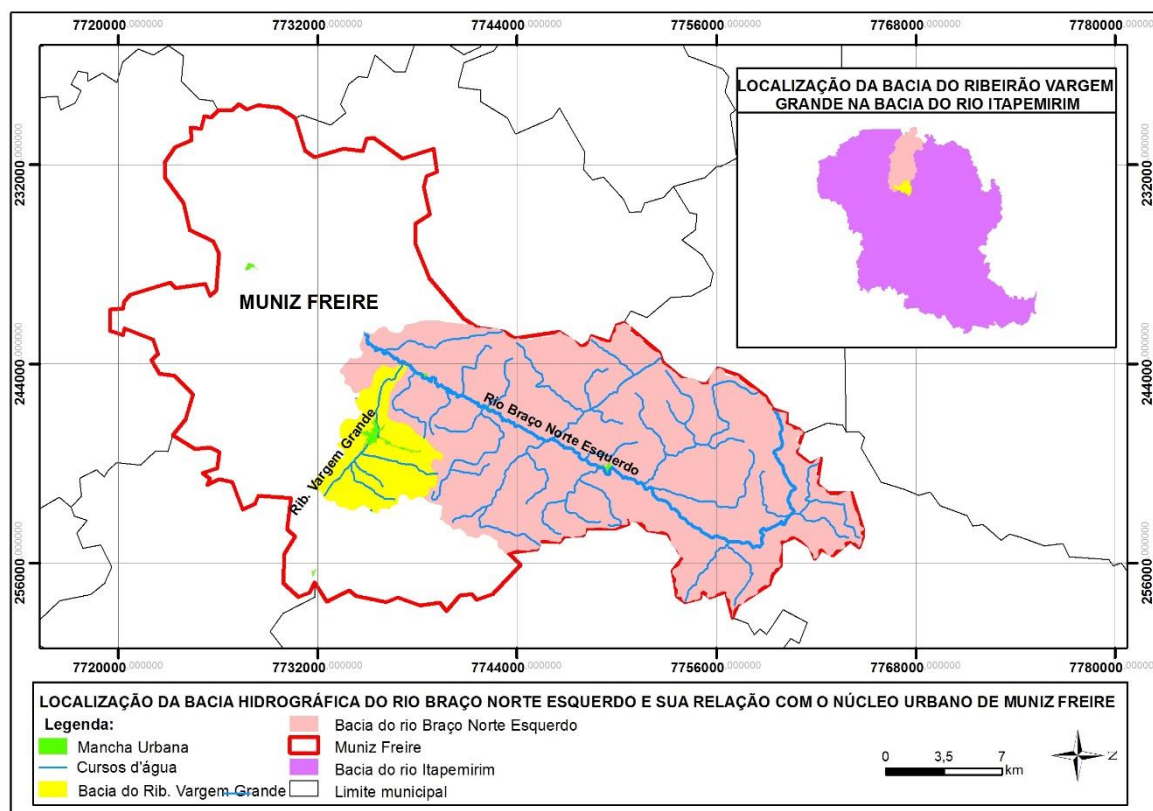


Figura 3 - Mapa de localização das bacias hidrográficas do ribeirão Vargem Grande e do rio Braço Norte Esquerdo e sua relação com o núcleo urbano da sede municipal de Muniz Freire

4.3 SUBDIVISÃO DA BACIA DO RIBEIRÃO VARGEM GRANDE

Visando possibilitar uma análise comparativa mais abrangente das respostas produzidas pelos modelos hidrológicos utilizados no presente estudo,

considerando diferentes aspectos observados na área de estudo (como, por exemplo, tamanho, declividade média e uso e ocupação do solo na área avaliada), optou-se pela divisão da bacia do ribeirão Vargem Grande em regiões hidrográficas menores, com influência direta sobre o núcleo urbano de Muniz Freire. As unidades hidrográficas escolhidas para as análises foram denominadas sub-bacia 1, com uso e ocupação do solo rural, e sub-bacia 2, urbanizada.

A sub-bacia 1 está situada na cabeceira da bacia do Ribeirão Vargem Grande, à montante do núcleo urbano de Muniz Freire, drenando uma área de 12,01 km², com perímetro de 17,93 m e cotas variando de 1140 m a 539 m. Constitui uma bacia rural sem existência de núcleo urbano, com 21 % de sua área é encoberta por vegetação nativa e 61 % de suas áreas são ocupadas por cultivos agrícolas e pastagens, destacando-se os cultivos de café. Observa-se, ainda, a presença de afloramentos rochosos espalhados pela área da bacia. A Figura 4 apresenta a sub-bacia 1 e sua relação com a bacia do Ribeirão Vargem Grande.

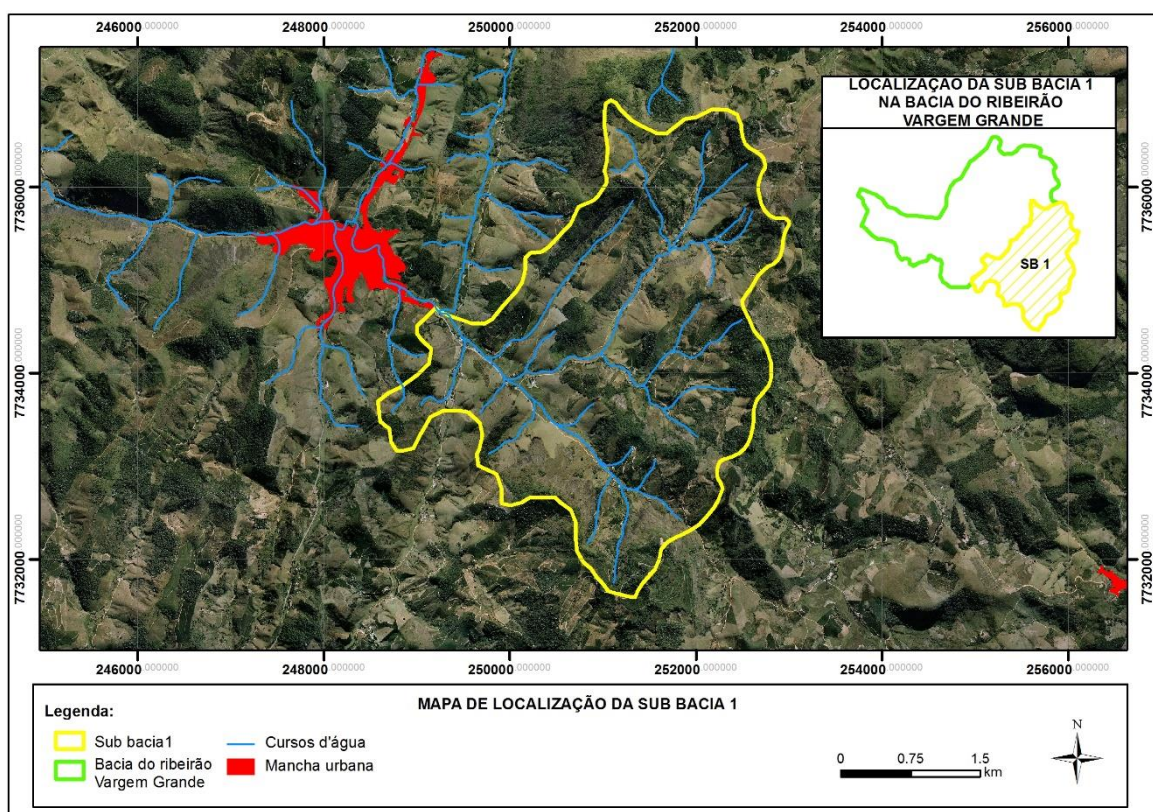


Figura 4 - Mapa de localização da sub-bacia 1

A sub-bacia 2 possui 2,86 km² de área e perímetro de 7,38 m, com cotas que variam de 813 m a 538 m, drenando a porção sudeste do centro urbano de Muniz Freire. Nesta sub-bacia está situada a maior porção do núcleo urbano do município. Cerca de 60% da bacia é encoberto por pastagens, seguidos pelos cultivos agrícolas e vegetação nativa, que ocupam 14% e 7% de sua área, respectivamente. A Figura 5 apresenta a sub-bacia 2 e sua relação com a bacia do Ribeirão Vargem Grande.

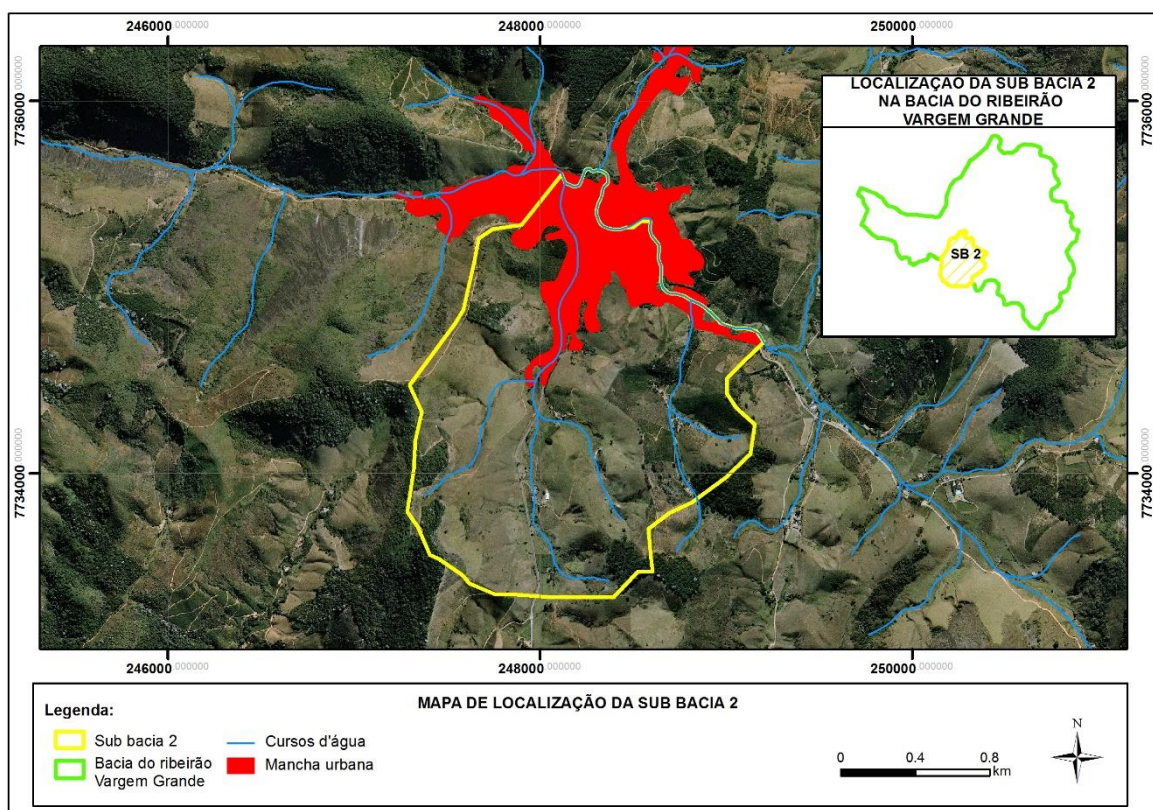


Figura 5 - Mapa de localização da sub-bacia 2

4.4 INFORMAÇÕES FISIAGRÁFICAS E HIDROLÓGICAS

Para o desenvolvimento das simulações hidrológicas nos modelos SWMM e HEC-HMS são requeridos dados fisiográficos e hidrológicos. Os dados fisiográficos representam as características físicas da bacia, como o relevo, hidrografia, tipo de solo, uso e ocupação do solo, entre outros. Tais características são habitualmente extraídas de mapas, imagens aéreas e de satélites. Os dados hidrológicos, por sua vez, compreendem a ocorrência, circulação e distribuição de água na bacia, como pluviometria, temperatura e clima.

Neste estudo foi priorizada a utilização de informações de domínio público, disponibilizadas gratuitamente por instituições públicas, buscando-se a não utilização de dados ou informações de domínio privado.

Os dados de topografia foram compostos pelo Modelo Digital de Elevação (MDE), produto das imagens de satélite do projeto *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) e pelas curvas de nível disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

O ASTER foi desenvolvido pela agência espacial norte-americana *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) em cooperação com o ministério da economia, comércio e indústria do Japão e o Centro de Sensoriamento Remoto e Análise de Dados da Terra (ERSDAC). O ASTER foi estabelecido a partir do processamento de imagens de satélite, produzindo dados altimétricos com resolução espacial de 30 metros. Para a área de estudo foram utilizados os dados altimétricos da carta ASTGTM_S24W047 (imagens disponíveis no portal eletrônico da ASTER GDEM).

O IBGE, por sua vez, disponibiliza, para a região situada ao sul do paralelo 20º, cartas topográficas para o Espírito Santo feitas em escala 1:50.000 e curvas com equidistância vertical de 20 metros. Foi utilizada a carta topográfica 2578-3, denominada Muniz Freire (arquivo disponibilizado no GEOBASES).

Os dados de hidrografia, com resolução de 1:50.000, assim como os dados de pedologia, baseado no Mapa Exploratório de Solos Radam Brasil, na escala 1:250.000, além dos dados de otobacia, limite municipal e mancha urbana, todos na forma de *shapefile*, foram extraídos do sitio eletrônico GEOBASES.

A caracterização do uso e ocupação do solo na área de estudo foi baseada no plano de informações referente ao mapeamento de uso e ocupação obtido a partir do ortofotomosaico produzido entre 2008 e 2010, na escala 1:15.000, disponível no Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA).

O levantamento das estações pluviométricas situadas no interior e nas proximidades da bacia de estudo foi conduzida com auxílio do Sistema de Informações Hidrológicas, de livre acesso no sitio eletrônico da Agência Nacional de Águas (ANA). A estação pluviométrica Usina Fortaleza, instalada e em

operação no município de Muniz Freire, foi a escolhida para conformação da equação de chuvas intensas para a área de estudo.

Uma vez realizada a apropriação de dados disponíveis para a área estudada, os dados fisiográficos e hidrológicos foram então processados com o auxílio do ArcGIS e da planilha eletrônica Microsoft Excel, permitindo a geração de arquivos de entrada de dados em formatos compatíveis com aqueles demandados pelos modelos HEC-HMS e SWMM.

4.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem hidrológica consiste no conjunto de procedimentos adotados para obtenção da resposta hidrológica das bacias que conformam a área de estudo para uma determinada chuva de projeto, representada pela vazão máxima e hidrograma associados. A seção reservada para a modelagem hidrológica é composta pelos seguintes itens: equação de chuvas intensas, tempos de concentração, construção dos hietogramas de projeto e apropriação de vazões de pico e volumes escoados.

4.5.1 Equação de chuvas intensas

O HEC-HMS e SWMM são modelos do tipo chuva-vazão, que simulam os processos de transformação da precipitação em escoamento superficial e permitem a estimativa das vazões de pico. Para tanto, é necessário que o usuário forneça os dados de precipitação como entrada para os referidos modelos.

Para apropriação de equações de chuvas intensas são comumente empregadas expressões no formato estabelecido pela Equação (06)

$$i = \frac{kT^m}{(t+t_0)^n} \quad (06)$$

Na Equação (06), i representa a intensidade máxima média da precipitação, t a duração da chuva, T o tempo de retorno; k , m , t_0 e n , por sua vez, são os parâmetros que localmente se deseja determinar. Uma vez determinados estes parâmetros a partir do emprego de técnica de otimização ou por meio de análise de regressão, estabelece-se a equação que representa a relação intensidade-duração-frequência válida para a região de influência da estação pluviométrica estudada.

Para localidades desprovidas de dados pluviográficos de longa duração, o método de Chow-Gumbel tem sido utilizado como alternativa para determinação da equação de chuvas intensas. Neste trabalho, a equação de chuvas intensas para o município de Muniz Freire foi estabelecida a partir do referido método, cuja aplicação envolveu as seguintes etapas:

- Seleção das máximas precipitações anuais de 1 dia de duração;
- Análise de frequências dos totais precipitados com ajuste da distribuição probabilística de Gumbel à série de máximas precipitações anuais de 1 dia. Dessa forma, foram estimadas as precipitações máximas anuais de 1 dia associadas aos períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.
- Obtenção, a partir dos totais precipitados de 1 dia, das precipitações para durações de 24 horas. Conforme sugerem Occhipinti e Santos (1996), a relação entre as chuvas máximas de 24 horas e 1 dia oscila em torno do valor de 1,14, fator de conversão utilizado neste trabalho;
- Determinação, a partir da avaliação da chuva com duração de 24 horas, das chuvas com mesma frequência de ocorrência, mas com menor duração. Foram empregados, nesta etapa do trabalho, os fatores de conversão apresentados na Tabela 1 os quais foram determinados por Pfafstetter (1957);
- Estabelecidas as alturas pluviométricas associadas a diferentes períodos de retorno e durações, as intensidades foram produzidas como simples relações entre alturas e durações;
- Definição de equações de chuvas intensas no formato estabelecido pela Equação (06). O ajuste do modelo estabelecido por meio da Equação (06) foi realizado com auxílio da Programação Não Linear (PNL), aplicada com auxílio do programa Solver, disponível na planilha Microsoft Excel. Para aplicação da PNL estabeleceu-se uma função objetivo que buscou minimizar o erro total entre os valores de intensidade pluviométrica estimados a partir das etapas de 1 a 5 ($i_{\text{Método}}$) e as intensidades estimadas com auxílio da Equação (06) ($i_{\text{Equação}}$), conforme Equação (07). Os parâmetros k , m , n e t_0 constituíram as variáveis de decisão do problema de otimização, com valores pertencentes ao conjunto R^+ .

$$\min f_0 = \sum_T \sum_t (i_{\text{Método}} - i_{\text{Equação}})^2 \quad (07)$$

Para a garantia de determinação do ótimo global foram testados diferentes valores iniciais para os parâmetros k , m , n e t_0 . O processo de otimização conduzido com auxílio da PNL foi repetido no mínimo 10 (dez) vezes.

Tabela 1 – Relação entre as alturas pluviométricas para precipitações de mesma frequência e diferentes durações.

Relação entre as alturas pluviométricas	Coefficientes de conversão
5 min / 30 min	0,34
10 min / 30 min	0,54
15 min / 30 min	0,70
20 min / 30 min	0,81
25 min / 30 min	0,91
30 min / 1 h	0,74
1 h / 24 h	0,42
6 h / 24 h	0,72

Fonte: Pfafstetter (1957).

Para a definição de equação intensidade-duração-frequência de chuvas aplicável ao município de Muniz Freire foi escolhida a estação pluviométrica Usina Fortaleza. A seleção foi decorrente da sua localização com relação à área de estudo e da extensão da série histórica, uma vez que a estação opera desde 1956. A Figura 6 apresenta a localização da estação pluviométrica Usina Fortaleza no município, e sua relação com a bacia do Ribeirão Vargem Grande.

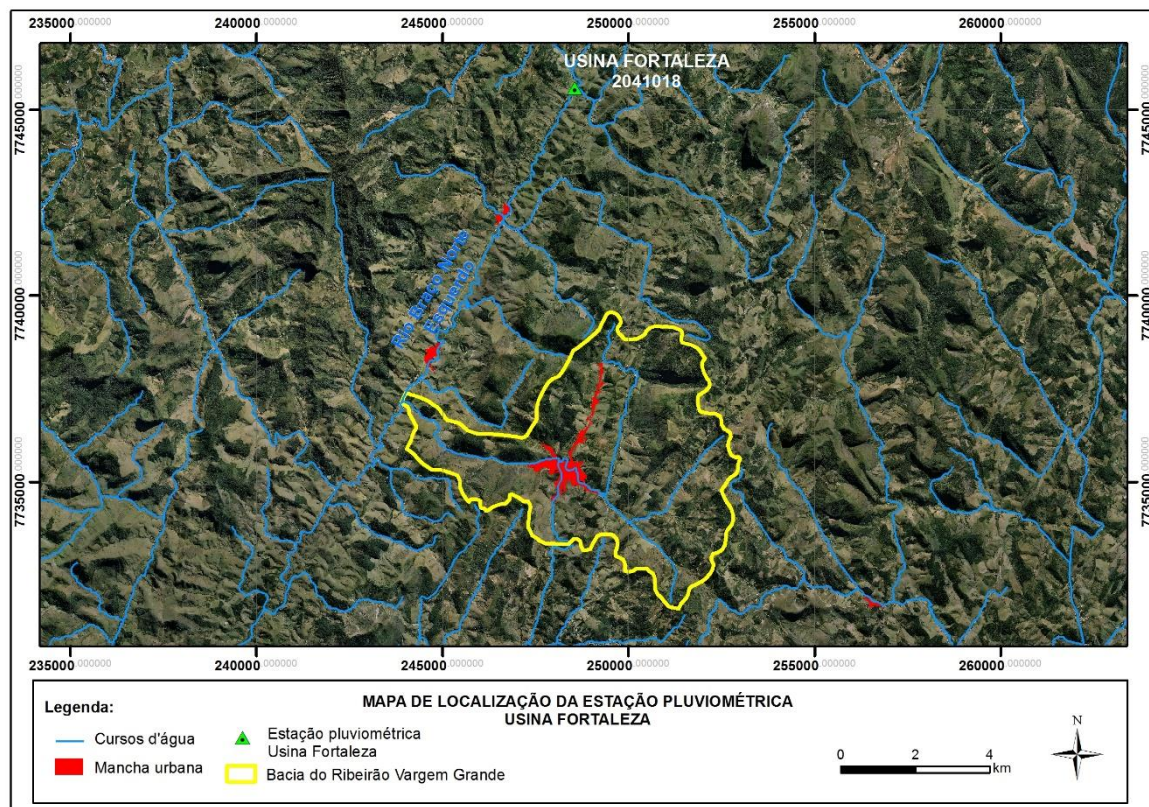


Figura 6 - Mapa de localização da estação pluviométrica Usina Fortaleza e sua relação com a bacia do ribeirão Vargem Grande

4.5.2 Tempo de concentração

O tempo de concentração pode ser definido como sendo o tempo, a partir do início da precipitação, necessário para que toda a bacia contribua com a vazão na seção de controle (CARVALHO; SILVA, 2006).

Ao longo dos anos, diversas equações para o cálculo do tempo de concentração foram formuladas visando à resolução de problemas práticos de engenharia. Por isso, a maior parte delas possui caráter empírico constituindo, basicamente, equações de regressão, desenvolvidas a partir de preceitos estatísticos. Assim, são obtidos diversos valores do tempo de concentração de acordo com o método escolhido, motivo pelo qual este parâmetro introduz incertezas no dimensionamento da vazão de pico (MCCUEN *et al.*, 1984).

As fórmulas para apropriação do tempo de concentração são escolhidas, de modo geral, pelas características da bacia hidrográfica como área, comprimento do talvegue, rugosidade e a declividade do córrego ou canal. Neste trabalho, função

das diferentes características das bacias avaliadas na área de estudo, os tempos de concentração foram obtidos a partir da fórmula do *US Corps of Engineers*.

Segundo DNIT (2005), a fórmula do *US Corps of Engineers* é aplicável a bacias urbanas e rurais, com área de drenagem de até 3000 km². Esta é originalmente uma fórmula de tempo de pico, devendo ser adaptada para tempo de concentração por meio da aplicação de um fator de correção de 1,67, a fim de não subestimar o resultado obtido.

A Equação (08), já com a incorporação do referido fator de correção, constitui a expressão proposta pelo *US Corps of Engineers* para apropriação do tempo de concentração.

$$T_c = \left(\frac{0,3L}{i^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (08)$$

Na Equação (08):

- T_c: Tempo de concentração, em horas;
- L: Comprimento do talvegue principal, em Km, e;
- i: Declividade, em %.

4.5.3 Construção dos hietogramas de projeto

Segundo Benfica et al. (2000), os hietogramas (ou chuvas) de projeto são metodologias de representação simplificada da distribuição temporal da precipitação, utilizadas basicamente como entrada em modelos de simulação do tipo chuva-vazão para dimensionamento de estruturas hidráulicas.

Para a construção dos hietogramas de projeto das bacias hidrográficas avaliadas foi empregado o método dos blocos alternados, uma alternativa comumente empregada quando não se dispõe de dados provenientes de pluviógrafos.

Através deste procedimento, após a definição do tempo de retorno e da duração total da chuva (T_d), dividida em “n” intervalos de duração Δt, são calculadas, com base nas relações IDF, as intensidades médias para as diversas durações Δt, 2Δt, 3Δt, etc, até a duração total, conforme equação (09).

$$T_d = n \cdot \Delta t \quad (09)$$

A partir do produto entre essas intensidades e as durações das chuvas são obtidas as alturas de chuva associadas a cada umas das durações, as quais representam os valores acumulados até o último intervalo.

Os incrementos (denominados “blocos”) entre um valor acumulado e outro são calculados e rearranjados, de forma que o maior valor se localize ao centro da duração total da chuva e os demais valores sejam dispostos, em ordem decrescente, sempre um à direita e outro à esquerda do bloco central, alternadamente, dando origem ao hietograma.

De acordo com IPH-UFRS (2005), o tempo total de simulação deve ser de, pelo menos, duas vezes o tempo de concentração da bacia, permitindo que toda a precipitação atue sobre o hidrograma de saída. Assim, para definição das respostas hidrológicas das regiões hidrográficas à precipitação incidente, assumiu-se que o tempo de duração da precipitação corresponderia a duas vezes o tempo de concentração de cada região e os respectivos períodos de recorrência foram definidos para 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Para a obtenção dos hietogramas pelo método dos blocos alternados foi elaborada uma planilha no Microsoft Excel.

4.5.4 Determinação dos demais parâmetros para modelagem hidrológica

- *Valor de CN*

A aplicação do método *Curve Number* do SCS para estimativa do escoamento superficial demanda os valores de CN e de abstração inicial, no caso da aplicação do modelo HEC-HMS.

O valor da abstração inicial consiste no volume da precipitação que deve ser assimilado pelo solo antes de que seja produzido um excesso de precipitação. Quando não se assume um valor para esse parâmetro o HEC-HMS assume automaticamente o valor correspondente a 0,2 vezes a retenção potencial (valor de referência), obtida a partir do valor de CN. No presente estudo optou-se por adotar o valor de referência para a abstração inicial.

De acordo com USDA (1986), o valor CN é um número de 0 a 100 que busca retratar a capacidade de infiltração da área em função do tipo de solo, do tipo de uso e ocupação e das condições de umidade de uma área.

A estimativa do valor de CN de uma determinada área demanda o cruzamento das informações do grupo hidrológico (Tabela 2) com o tipo de uso e ocupação do solo (Tabela 3), apropriando-se, na sequência, do valor correspondente da tabela de valores de referência fornecidos pelo SCS.

A seleção da tabela de valores de CN é feita de acordo com as condições de umidade antecedentes que se deseja assumir, que podem ser as seguintes:

- Condição I: solo seco, sem atingir ponto de murcha;
- Condição II: situação média das condições do solo;
- Condição III: solo saturado;

O manual técnico do HEC-HMS (USACE, 2000) sugere como valor de referência a condição média de umidade, correspondente à condição II.

Antes da apropriação dos valores de CN, a partir da Tabela 2 e da Tabela 3, foi realizada uma etapa preliminar, que consistiu na sobreposição das classes de uso e ocupação disponíveis no plano de informação consultado com as classes apresentadas nas tabelas. Para tanto, foi analisado cada uso existente e, na sequência, buscou-se na tabela a classificação que melhor representasse esse uso. Essa informação foi inserida como atributo na tabela do plano de informação de uso e ocupação selecionado para o presente estudo, reproduzindo-se procedimento detalhadamente apresentado por SOUZA (2017).

A Tabela 4 apresenta a classificação do uso do solo do plano de informação e a classificação que se assumiu como correspondente na Tabela 3, bem como os valores de CN relativos a essa classificação. Embora essas informações representem resultados parciais, optou-se por antecipá-los nesta seção com o objetivo de facilitar o entendimento da metodologia empregada para apropriação do CN.

Tabela 2 - Classificação dos solos considerando as condições brasileiras.

Grupo de Solo	Características	Tipos de solos que se enquadram
A	<p>Solos muito profundos (prof. > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm);</p> <p>Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância à erosão;</p> <p>Solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20);</p> <p>Solos de textura média;</p> <p>Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macro porosidade em todo o perfil;</p> <p>Solos bem drenados ou excessivamente drenados;</p> <p>Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1;</p> <p>A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa</p>	<p>LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macro porosidade;</p> <p>LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.</p>
B	<p>Solos profundos (100 a 200 cm);</p> <p>Solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão;</p> <p>Solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50;</p> <p>Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso;</p> <p>Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macro porosidade em todo o perfil;</p> <p>Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1;</p> <p>A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa.</p>	<p>LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa;</p> <p>LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZARÊNICO; ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.</p>
C	<p>Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm);</p> <p>Solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão;</p> <p>São solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta;</p> <p>Solos associados a argila de atividade baixa (Tb);</p> <p>A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa.</p>	<p>ARGISSOLO pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta;</p> <p>CAMBISSOLO de textura média e CAMBIS-SOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.</p>
D	<p>Solos com taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância a erosão;</p> <p>Solos rasos (prof. < 50 cm);</p> <p>Solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade (Ta), minerais de argila 2:1;</p> <p>Solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta)</p> <p>Solos orgânicos.</p>	<p>NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA;</p> <p>Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C;</p> <p>ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.</p>

Fonte: Sartori et al (2005).

Tabela 3 - Tabela de valores de CN do SCS de acordo com uso e ocupação do solo e as condições hidrológicas (condição II de umidade)

Uso do solo	Superfície do Solo	Grupo Hidrológico			
		A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curva de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Esparsas	36	60	73	79
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras e estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más condições	72	82	87	89
	De superfície compactada	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76
Zonas Cultivadas	Sem conservação do solo	72	81	88	91
	Com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições de		68	79	86	89
Baldios em boas condições		39	61	74	80
Prado em boas condições		30	58	71	78
Bosques ou zonas com cobertura ruim		45	66	77	83
Floresta: cobertura boa		25	55	70	77

Tabela 3 - Tabela de valores de CN do SCS de acordo com uso e ocupação do solo e as condições hidrológicas (condição II de umidade) (continuação)

Uso do solo	Superfície do Solo	Grupo Hidrológico			
		A	B	C	D
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, em boas condições	Com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
	Com relva de 50% a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Zonas residenciais					
	Lotes (m ²)	% média impermeável			
	<500	77	85	90	92
	1000	61	75	83	87
	1300	57	72	81	86
	2000	54	70	80	85
	4000	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos		98	98	98	98
Arruamentos e estradas					
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais		98	98	98	98
Paralelepípedos		76	85	89	91
Terra		72	82	87	89

Fonte: Adaptado de Tucci et al (1993).

Tabela 4 - Valores de CN considerados no estudo

Uso do solo (Plano de informação)	Uso do solo (Livre tradução da tabela do SCS)	A	B	C	D
Afloramento Rochoso	Área impermeável	98	98	98	98

Área Edificada	Área impermeável	61	75	83	87
Brejo	Área impermeável	98	98	98	98
Campo Rupestre/Altitude	Campos (condições hidrológicas boas)	30	48	65	73
Cultivo Agrícola - Banana	Cultivos de árvores frutíferas ou similares (condições hidrológicas normais)	43	65	76	82
Cultivo Agrícola – Café	Cultivos de árvores frutíferas ou similares (condições hidrológicas normais)	43	65	76	82
Cultivo Agrícola - Coco-Da-Baía	Cultivos de árvores frutíferas ou similares (condições hidrológicas normais)	43	65	76	82
Cultivo Agrícola - Outros Cultivos Permanentes	Cultivos de árvores frutíferas ou similares (condições hidrológicas normais)	43	65	76	82
Cultivo Agrícola - Outros Cultivos Temporários	Cultivos em fileiras próximas e curvas (condições hidrológicas boas)	55	69	78	83
Extração Mineração	Solo exposto	77	86	91	94
Macega	Campos (condições hidrológicas normais)	35	56	70	77
Massa D'Água	Área impermeável	98	98	98	98
Mata Nativa	Áreas florestadas (condições hidrológicas boas)	30	55	70	77
Mata Nativa em Estágio Inicial de Regeneração	Áreas florestadas (condições hidrológicas normais)	36	60	73	79
Outros	Chácaras e estradas	59	74	82	86
Pastagem	Pasto em condições normais	49	69	79	84
Reflorestamento – Eucalipto	Áreas florestadas (condições hidrológicas normais)	36	60	73	79
Reflorestamento – Pinus	Áreas florestadas (condições hidrológicas normais)	36	60	73	79
Solo Exposto	Solo exposto	77	86	91	94

Fonte: Adaptado de Souza (2017)

Os valores de CN apropriados para cada uma das sub-bacias foram obtidos por meio do cruzamento de dados dos mapas de uso e ocupação do solo (figuras 7 a 9) e pedologia (figuras 10 a 12).

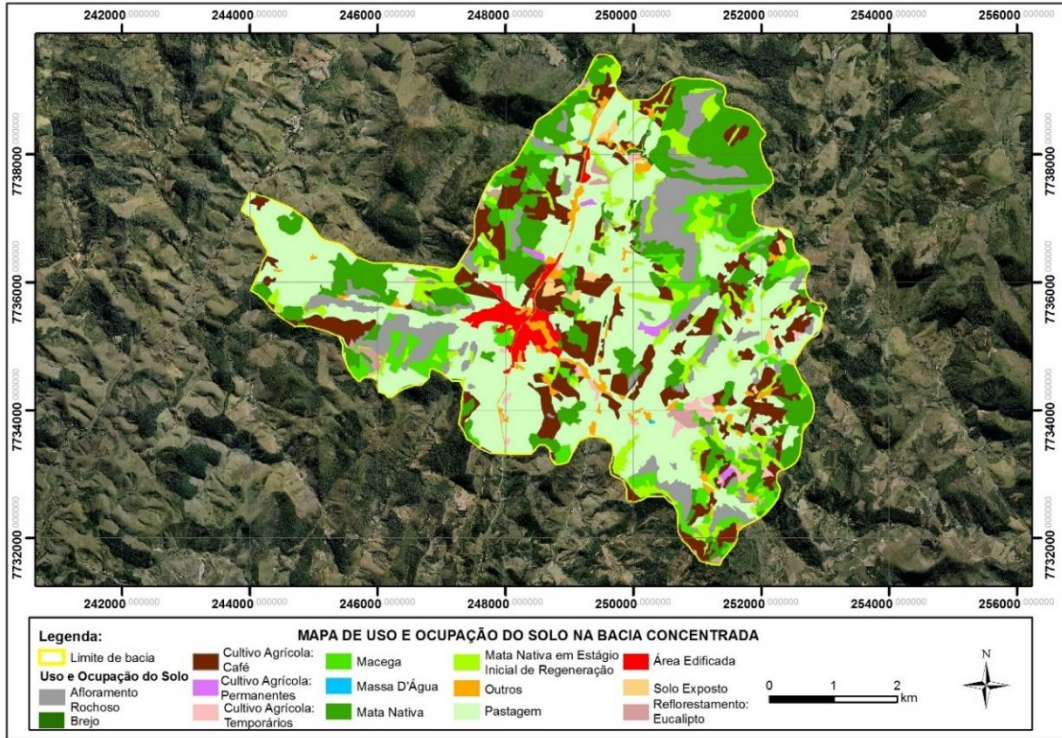


Figura 7 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia Concentrada
(Adaptado de Souza, 2017)

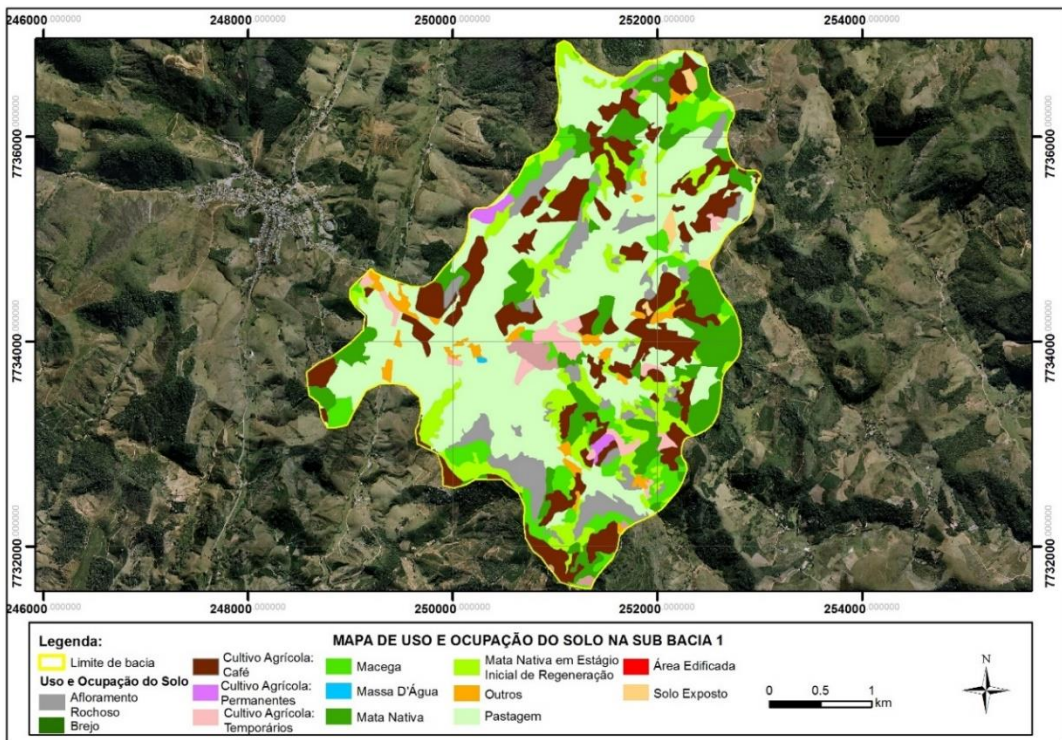


Figura 8 - Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia 1
(Adaptado de Souza, 2017)

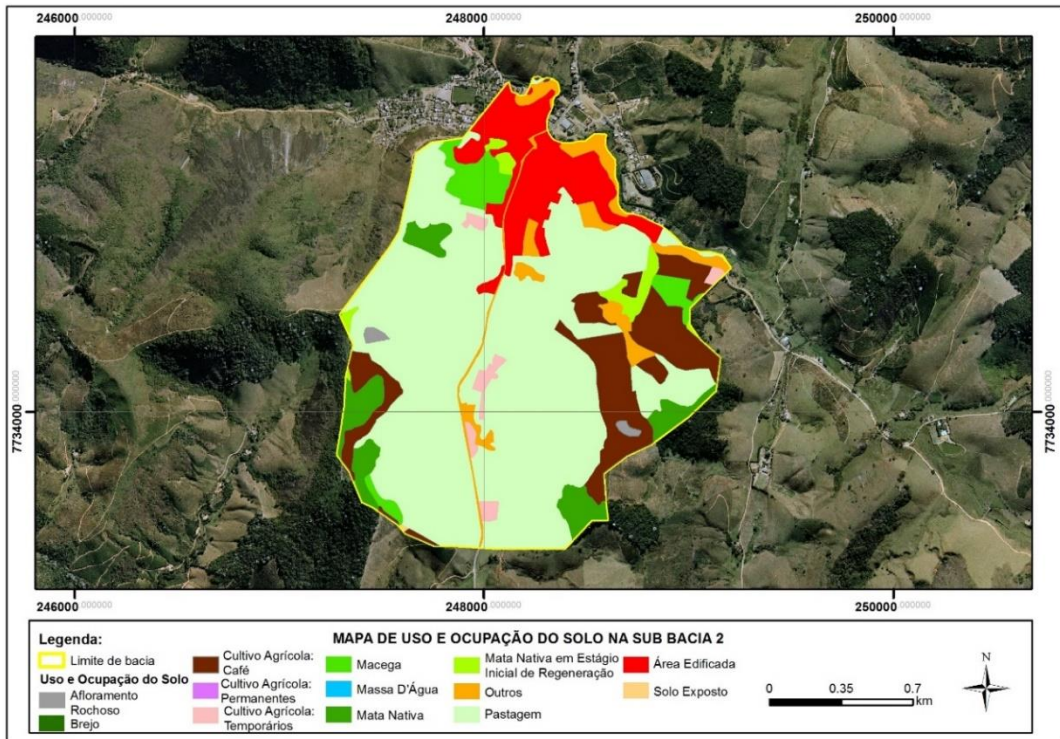


Figura 9 - Mapa de uso e ocupação do solo na sub-bacia 2

(Adaptado de Souza, 2017)

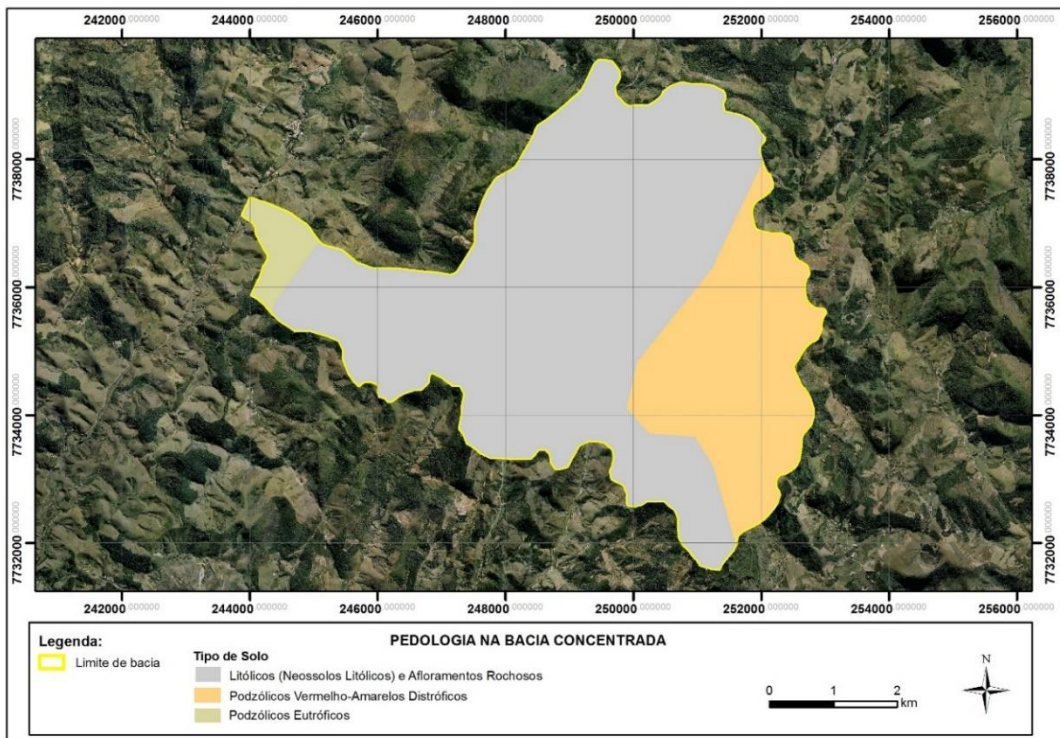


Figura 10 - Mapa de pedologia da bacia Concentrada

(Adaptado de Souza, 2017)

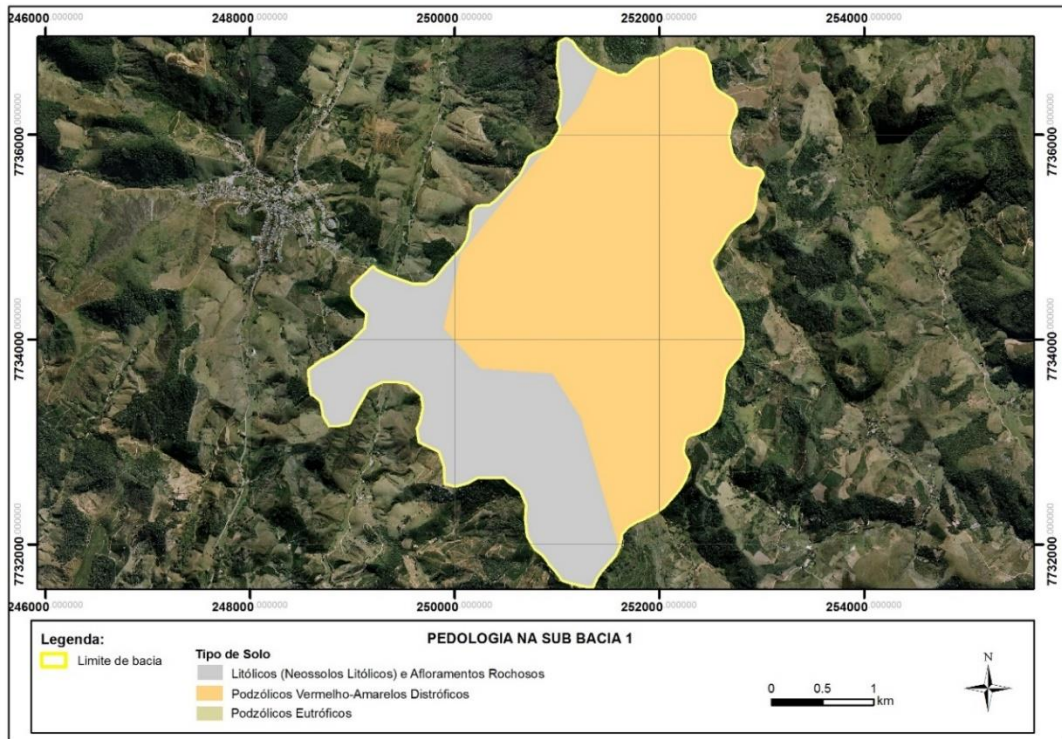


Figura 11 - Mapa de pedologia da sub-bacia 1

(Adaptado de Souza, 2017)

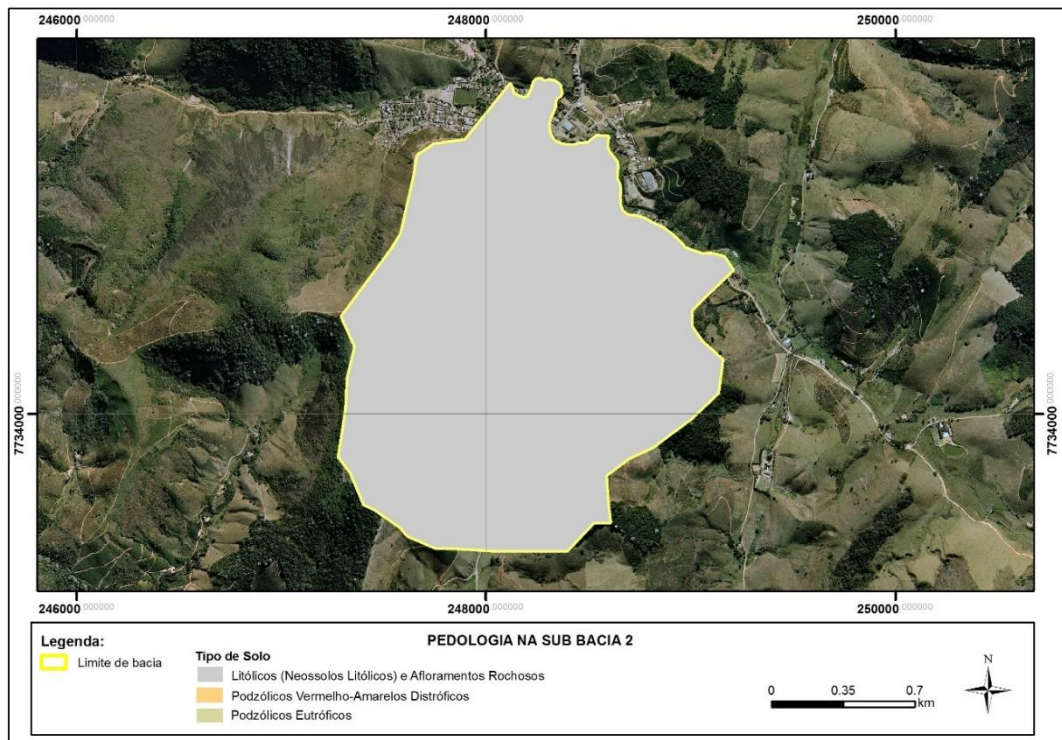


Figura 12 - Mapa de pedologia da sub-bacia 2

(Adaptado de Souza, 2017)

- *Percentual da área impermeável*

As áreas impermeáveis constituem porções da superfície que, função da reduzida capacidade de infiltração, convertem em escoamento superficial praticamente toda a precipitação recebida. Sua determinação é função, portanto, do tipo de solo e do uso e ocupação associados ao solo.

Diferentes abordagens podem ser empregadas para a determinação do percentual de áreas impermeáveis. Fórmulas empíricas, como aquelas propostas por Campana e Tucci (1994), permitem a determinação de áreas impermeáveis para grandes centros urbanos a partir de valores da densidade populacional. Outras abordagens condicionam a determinação do percentual de área impermeável em função dos valores do CN; no trabalho proposto por Souza (2017), por exemplo, quando da aplicação do Método SCS seriam consideradas impermeáveis áreas cujos valores de CN estivessem compreendidos entre 61 (área edificada assentada sobre solos tipo A) e 98 (afloramentos rochosos).

Como a área de estudo abarca núcleo urbano de pequeno porte, não foi considerada a possibilidade de aplicação de expressões empíricas que permitam a determinação do percentual de área impermeável em função da densidade populacional. Desta forma, o percentual de área considerada impermeável foi associado ao valor estimado para o parâmetro CN.

- *Tempo de retardo para aplicação do método SCS (Lag time)*

O tempo de retardo, necessário para aplicação do método do hidrograma unitário associado ao método SCS, pode ser determinado por calibração, quando se dispõe de dados históricos. Na ausência dessas informações, o *SCS Technical Report 55* (1986) recomenda o uso da equação (10) para estimar o tempo de retardo.

$$t_{lag} = 0,6 \times t_c \quad (10)$$

Na equação (10):

- t_{lag} : Tempo de retardo do SCS, em min, e;
 - t_c : Tempo de concentração, em min.
- *Sentido do escoamento*

O modelo SWMM permite ao usuário a escolha do sentido do escoamento superficial entre área permeáveis e impermeáveis:

- **Impervious:** escoamento a partir da área permeável para a área impermeável;
- **Pervious:** escoamento a partir da área impermeável para a área permeável e;
- **Outlet:** escoamento a partir de ambas áreas diretamente para o exutório da sub-bacia.

Quando do emprego do modelo HEC-HMS, a perspectiva de estabelecimento do escoamento de áreas impermeáveis para áreas permeáveis pode ser incorporada por meio de correções sobre o valor do CN, conforme sugerido por SCS (1986).

Neste estudo assumiu-se que os escoamentos, sejam eles associados às áreas permeáveis ou às áreas impermeáveis, foram encaminhados diretamente para o exutório da área de estudo. Assumiu-se, desta forma, o modo *outlet* para representação do sentido do escoamento superficial, quando do emprego do modelo SWMM, e não foi incorporada qualquer correção sobre o valor do CN, quando do emprego do modelo HEC-HMS.

- *Coeficiente de rugosidade de manning “n”*

O modelo SWMM requer, adicionalmente, a apropriação de um valor para o coeficiente de rugosidade de Manning para áreas impermeáveis e outro para áreas permeáveis. Neste trabalho adotou-se os valores de referência do modelo para os referidos parâmetros. São eles 0,01 para áreas impermeáveis e 0,1 para as áreas permeáveis.

- *Armazenamento em depressões*

Nos modelos SWMM e HEC-HMS não foi considerado o armazenamento em depressões para nenhuma das unidades hidrográficas avaliadas.

4.5.5 Estimativa da vazão de pico e do escoamento superficial

A vazão de pico é entendida como a maior vazão que ocorre em uma seção ou curso d'água num período definido, fundamental para a representação das condições de inundação de um local.

As estimativas de vazões de pico associadas a um período de recorrência são fundamentais para a adequada tomada de decisão sobre medidas estruturais e não estruturais acerca de dispositivos de micro e macrodrenagem, para o dimensionamento de obras hidráulicas, bem como para projetos de conservação do solo e água (AVANTEC, 2013; TEIXEIRA *et al.*, 2011; GENOVEZ, 2003).

Nesta seção são descritas as etapas inerentes à simulação do processo de conversão chuva-vazão nos modelos SWMM e no HEC-HMS, assim como a inserção dos parâmetros e dados de entrada requeridos por cada modelo. É importante ressaltar que neste trabalho foram utilizados, sempre que possível, os mesmos métodos para descrição dos processos hidrológicos por meio de ambos modelos. Esta perspectiva buscou tornar mais consistentes as comparações entre as respostas produzidas pelos modelos SWMM e o HEC-HMS. A eventual existência de diferentes dados e parâmetros requeridos se devem às diferenças entre as estruturas conceituais e computacionais associadas aos referidos modelos.

Nas simulações hidrológicas realizadas por ambos modelos foram estimadas, para a bacia concentrada e as sub-bacias 1 e 2, volumes escoados superficialmente e vazões de pico referentes aos períodos de recorrência de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

4.5.5.1 Simulação hidrológica no modelo SWMM

A simulação hidrológica das unidades hidrográficas estudadas foi realizada no pacote computacional SWMM 5.0.22 Brasil, no bloco “*runoff*”, responsável pela geração do escoamento superficial e apropriação das vazões de pico. Para aplicação do modelo SWMM foram realizadas as etapas relacionadas no fluxograma apresentado por meio da Figura 13.

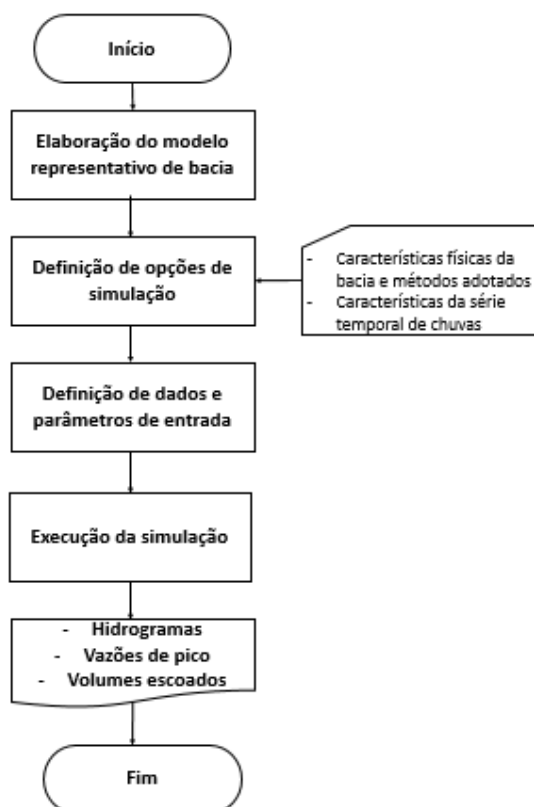


Figura 13 – Fluxograma das atividades associadas à aplicação do modelo SWMM

4.5.5.1.1 Modelo representativo de bacia

A primeira etapa para realização das simulações consistiu na elaboração do modelo representativo da bacia hidrográfica na forma de um esquema gráfico do mapa da área de estudo. Uma vez que cada unidade hidrográfica foi avaliada isoladamente, o modelo de bacia no SWMM para cada unidade hidrográfica foi composto por sub-bacia, trecho e nó, além de um pluviômetro associado à cada sub-bacia. A interface gráfica do modelo está apresentada na Figura 14.

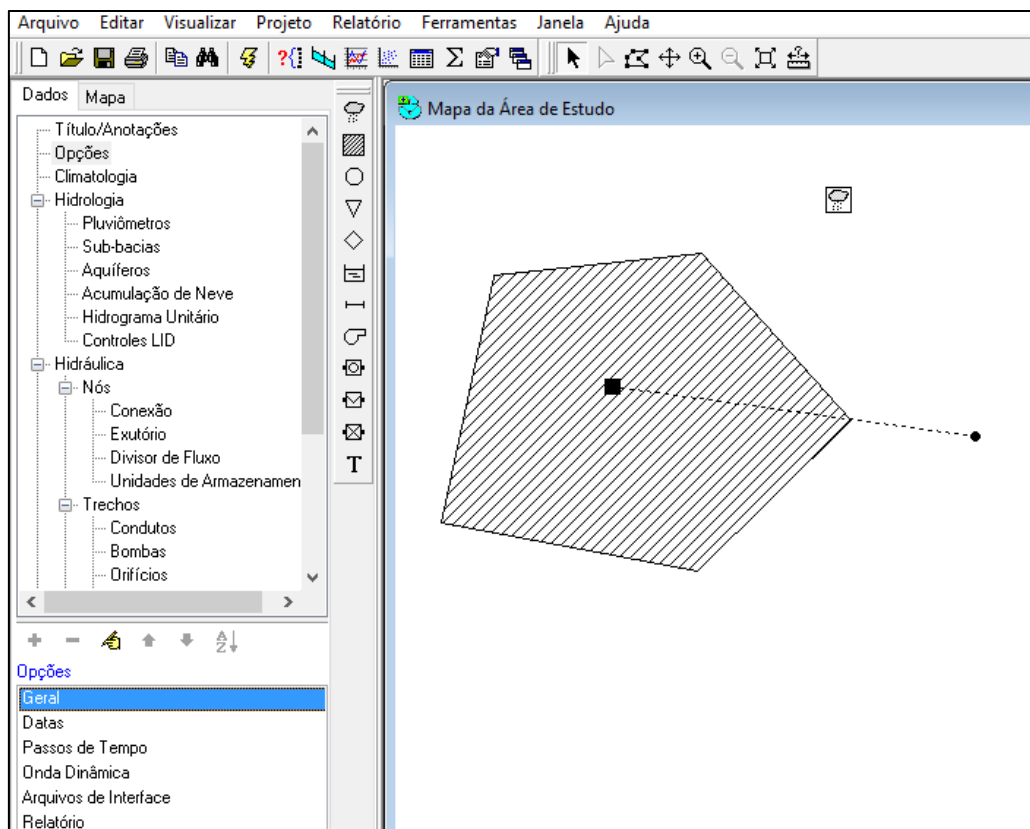


Figura 14 – Interface gráfica da tela principal do modelo SWMM: representação do modelo de sub-bacia

4.5.5.1.2 Opções de simulação

Na segunda etapa foram definidas as opções gerais de simulação do modelo. Nesta etapa foram configurados os processos físicos a serem simulados, o método de infiltração, data e passo de tempo da simulação, além de ferramentas extras de simulação e arquivos de interface.

Na tela principal do modelo, na aba “opções de simulação”, foi selecionado a opção chuva/vazão para o modelo de processo físico. Para “Modelo de infiltração” foi selecionada a opção “curva-número”.

Na aba “Data” foram definidas as datas de início e fim da análise e para geração do relatório, além da definição dos dias antecedentes sem chuva. Na aba “Passo de tempo” foram definidos os passos de tempo para elaboração do relatório e para estimativa do processo de escoamento.

4.5.5.1.3 Inserção de dados e definição de parâmetros

Nesta etapa é realizada a edição das propriedades fisiográficas dos objetos que compõem o sistema modelado, dos parâmetros requeridos pelo modelo conforme o método adotado, assim como dos dados referentes à chuva de projeto. Neste trabalho, uma vez que as simulações avaliam isoladamente cada porção da área de estudo, o objeto sub-bacia foi o único elemento com parâmetros fornecidos manualmente pelo usuário.

Nesta etapa foi também definido o modelo de infiltração da chuva. No presente trabalho, conforme previamente estabelecido, optou-se pelo método de infiltração baseado na Curva Número do SCS.

Uma vez definidas as características físicas da bacia, o modelo foi alimentado com os dados de chuva. Na aba “Séries temporais” foi criado um arquivo de dados composto pelos dados de altura de chuva para o período de duração da chuva e o respectivo hietograma resultante, como pode ser observado na Figura 15.

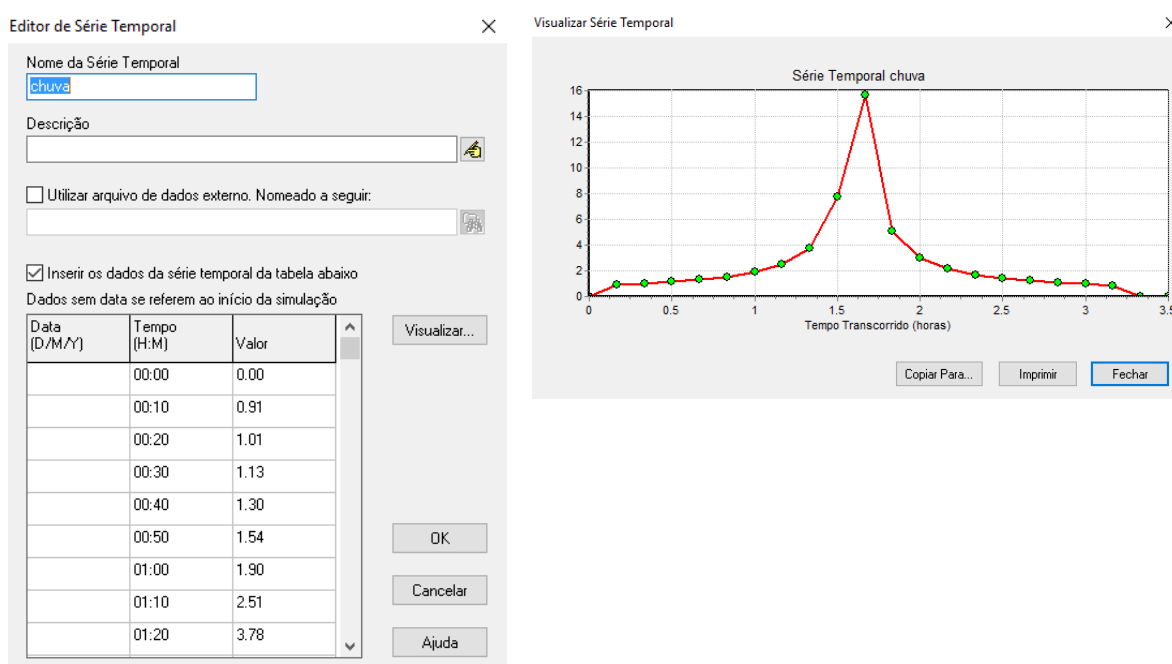


Figura 15 – Tela de entrada para o hietograma de projeto

Por fim, a simulação hidrológica foi executada para cada período de retorno adotado.

4.5.5.2 Simulação hidrológica no modelo HEC-HMS

Para obtenção dos hidrogramas e apropriação das correspondentes vazões de pico foi utilizado o software HEC-HMS em sua versão 3.5. As etapas que conformam o processo de simulação de cada unidade hidrográfica com auxílio do referido modelo estão relacionadas no fluxograma apresentado por meio da Figura 16.

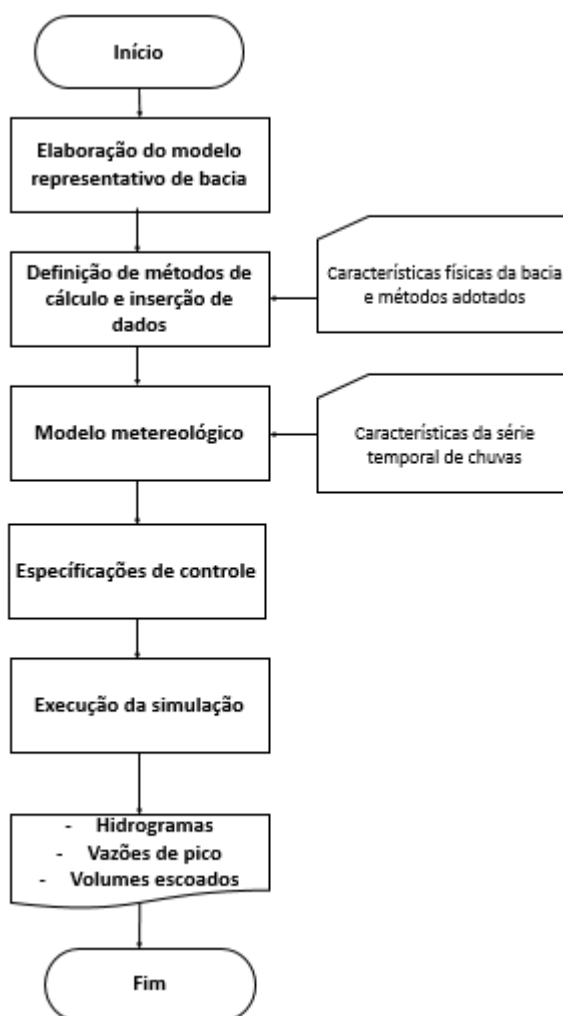


Figura 16 – Fluxograma de atividades associadas à aplicação do modelo HEC-HMS

4.5.5.2.1 Modelo representativo de bacia

O primeiro passo para a realização das simulações consistiu na elaboração do modelo representativo de bacia na forma de um esquema gráfico do mapa da área de estudo. Uma vez que cada unidade foi representada de forma isolada, o

modelo de bacia no HEC-HMS é formado pelo elemento físico bacia, além do pluviômetro associado. A Figura 17 apresenta a interface gráfica do modelo de bacia utilizado.

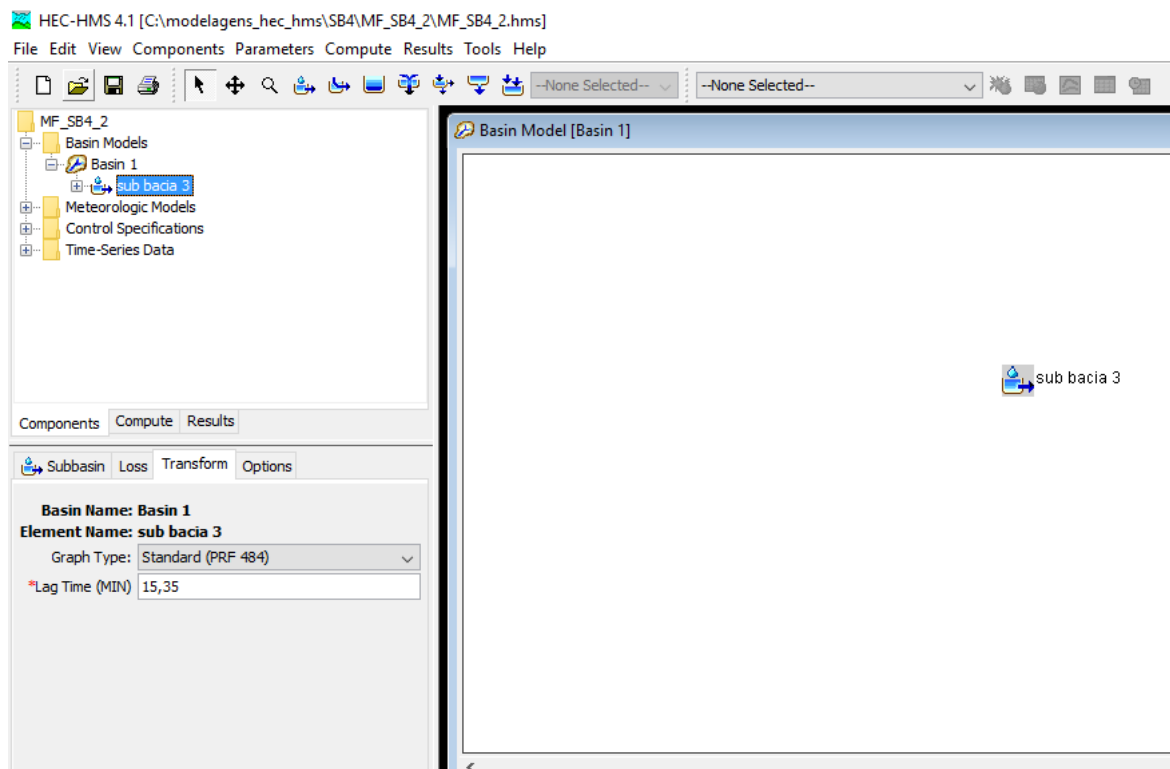


Figura 17 - Interface gráfica da tela principal do modelo HEC-HMS: representação do modelo de sub-bacia

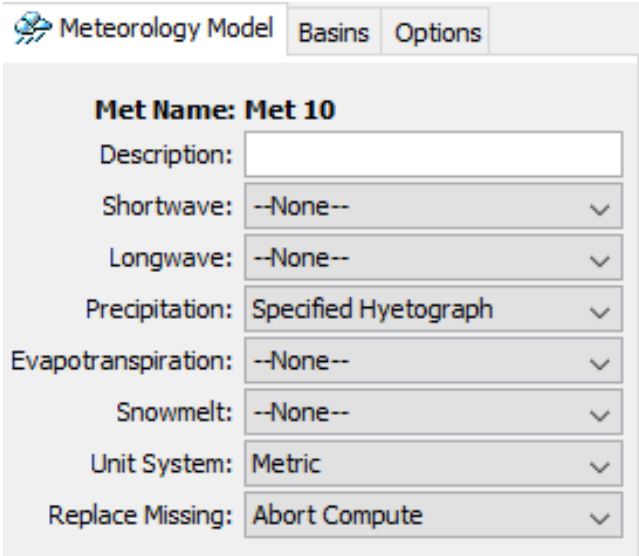
Em seguida foram inseridas as informações referentes à área da bacia avaliada e indicados os métodos de apropriação das perdas (*SCS Curve Number*) e do escoamento superficial (*SCS Unit Hydrograph*).

Com base nos métodos definidos na aba principal, foram então habilitados nas abas "*Loss*" e "*Transform*" os parâmetros de entrada requeridos pelo método selecionado na tela principal.

4.5.5.2.2 Modelo meteorológico

Uma vez inseridos os parâmetros de entrada dos modelos referentes aos métodos escolhidos para apropriação de perdas e do escoamento superficial, foram então definidas as condições meteorológicas de simulação. Nesta etapa foi definido o método para entrada dos dados e a forma de hietograma utilizado.

Inicialmente foi criado o gerenciador do modelo meteorológico, onde foram definidos o método de apropriação do hietograma de projeto, conforme apresentado na Figura 18. Neste trabalho foi utilizado o método do hietograma especificado pelo usuário (a construção do hietograma de projeto está descrita no item 5.3.3).



Meteorology Model	
Basins Options	
Met Name:	Met 10
Description:	<input type="text"/>
Shortwave:	--None--
Longwave:	--None--
Precipitation:	Specified Hyetograph
Evapotranspiration:	--None--
Snowmelt:	--None--
Unit System:	Metric
Replace Missing:	Abort Compute

Figura 18 - Gerenciador de modelo meteorológico no HEC-HMS

Na sequência, foi criado o pluviômetro associado à área de estudo, onde foram inseridos os dados correspondentes ao hietograma, a forma de apropriação dos valores intensidade de chuva, as unidades de entrada e o intervalo de tempo entre os valores de intensidade de chuva que se pretende informar.

Na sequência, foram inseridas as informações referentes ao início e fim da série de dados. Como se trata de uma série de dados artificial, produzida a partir de um hietograma, manteve-se a data e horário de início e alterou-se a data e hora de fim, considerando essa última como o tempo de duração utilizado na obtenção do hietograma, em horas.

4.5.5.2.3 Especificações de controle

Definidos os modelos de bacia e meteorológico, foi criado um arquivo de controle das simulações. Esse arquivo contém as informações referentes ao tempo total de simulação e ao passo de tempo das simulações.

4.5.5.2.4 Execução da simulação

Uma vez realizadas as configurações e entrada de dados de todos os parâmetros requeridos para a simulação no HEC-HMS, assim como dos métodos escolhidos para representação dos processos simulados, foi criado o arquivo de simulação, informando para o *software* o modelo de bacia, o modelo meteorológico e o arquivo de controle que deverá ser empregado na simulação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações hidrológicas sintetizadas pelos modelos HEC-HMS e SWMM produziram como resposta principal à precipitação de projeto o hidrograma de escoamento superficial associado a uma vazão de pico para o exutório de cada unidade hidrográfica para os períodos de recorrência de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Para análise dos resultados obtidos nas simulações foram definidos os seguintes itens de comparação:

- Vazão de pico estimada para cada período de recorrência;
- Volume total de escoamento superficial para cada período de recorrência;
- Tempo de pico do hidrograma.

Nas seções a seguir são apresentadas **a)** as características fisiográficas da área de estudo, **b)** a equação de chuvas intensas utilizada no processo de transformação chuva-vazão, **c)** os tempos de concentração estimados e os hietogramas de projeto, **d)** os valores de CN, percentuais de área impermeável e tempos de retardo associados a área de estudo e **e)** as respostas hidrológicas obtidas por meio das simulações conduzidas com auxílio dos modelos SWMM e HEC-HMS para cada uma das unidades hidrográficas avaliadas.

É relevante observar que para a avaliação das respostas hidrológicas serão apresentados os valores de vazão de pico e volume total de escoamento superficial produzidos, assim como os hidrogramas correspondentes para as simulações.

5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSIOGRÁFICAS

Os parâmetros fisiográficos área, largura característica e declividade média das unidades hidrográficas avaliadas foram obtidos por meio da ferramenta ArcGIS. Os valores obtidos para cada uma das unidades hidrográficas avaliadas estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros fisiográficos das unidades hidrográficas

Parâmetro	Bacia concentrada	Sub-bacia 1	Sub-bacia 2
Área (km ²)	35,28	12,01	2,86
Área (ha)	3528,00	1201,00	286,00
Largura característica (m)	2628,40	2239,40	1018,93
Declividade (%)	5,50	11,21	9,76

5.2 EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação do Método de Chow-Gumbel, quando da definição da equação intensidade-duração-frequência aplicável ao município de Muniz Freire, conforme procedimento descrito na seção 5.4.1.

A Tabela 6 apresenta as precipitações máximas anuais medidas na estação Usina Fortaleza entre os anos 1957 e 2015. Não foram consideradas as precipitações máximas anuais para os anos de 1960, 1972, 1990, 1991, 1992, 1994, 1995 e 2010 função da qualidade das séries de totais diários precipitados nestes anos, com recorrentes falhas nos meses tipicamente chuvosos no município de Muniz Freire.

Tabela 6 - Precipitações máximas anuais medidas na estação Usina Fortaleza entre os anos 1957 e 2015

Ano	Chuva	Ano	Chuva	Ano	Chuva	Ano	Chuva
1957	69,80	1971	102,50	1985	67,90	2004	110,80
1958	73,40	1972	-	1986	59,00	2005	83,20
1959	74,00	1973	80,40	1987	67,60	2006	74,10
1960	-	1974	61,40	1988	80,80	2007	67,60
1961	68,00	1975	69,40	1989	72,40	2008	96,60
1962	66,80	1976	84,40	1993	82,20	2009	100,40
1963	90,20	1977	68,00	1996	76,20	2010	-
1964	57,00	1978	84,10	1997	98,80	2011	66,20
1965	77,40	1979	94,40	1998	52,60	2012	72,60
1966	74,60	1980	75,60	1999	78,30	2013	68,00
1967	88,80	1981	103,60	2000	94,00	2014	77,00
1968	91,00	1982	127,40	2001	84,60	2015	97,50
1969	100,50	1983	90,10	2002	64,60	-	-
1970	64,40	1984	63,40	2003	55,20	-	-

A Tabela 7 apresenta as precipitações máximas anuais de 1 dia associadas a diferentes períodos de retorno, produzidas a partir do ajuste de distribuição probabilístico de Gumbel à série de máximas precipitações anuais de 1 dia.

Tabela 7 - Precipitações máximas anuais de 1 dia associadas a diferentes períodos de recorrência para a estação Usina Fortaleza

Período de recorrência (anos)	Precipitação máxima anual (mm)
2	76,1
5	90,9
10	100,8
20	110,2
50	122,4
100	131,6

A Tabela 8 por sua vez, apresenta as alturas pluviométricas estimadas para a estação pluviométrica Usina Fortaleza, considerados diferentes períodos de recorrência e diferentes durações.

Tabela 8 - Precipitações máximas (em mm) para a estação pluviométrica Usina Fortaleza, associadas a diferentes períodos de recorrência e durações

Duração	Período de recorrência					
	2	5	10	20	50	100
24h	86,7	103,7	114,9	125,6	139,6	150,0
12h	73,7	88,1	97,6	106,8	118,6	127,5
10h	71,1	85,0	94,2	103,0	114,4	123,0
8h	67,7	80,9	89,6	98,0	108,9	117,0
6h	62,5	74,6	82,7	90,5	100,5	108,0
1h	36,4	43,5	48,3	52,8	58,6	63,0
30min	27,0	32,2	35,7	39,1	43,4	46,6
20min	21,8	26,1	28,9	31,6	35,1	37,8
10min	14,6	17,4	19,3	21,1	23,4	25,2
5min	9,2	11,0	12,1	13,3	14,8	15,9

A equação (11), por fim, apresenta a relação intensidade-duração-frequência obtida para a estação pluviométrica Usina Fortaleza a partir do emprego de Programação Não-Linear.

$$i = \frac{13.991T^{0.128}}{(t+11.012)^{0.748}} \quad (11)$$

Na equação (11):

- i: Intensidade da chuva, em mm/minuto;
- T: Tempo de recorrência, em anos, e;
- t: Tempo de duração da chuva, em minutos.

A Figura 19 representa graficamente as curvas intensidade, duração e frequência, considerados diferentes períodos de recorrência, obtidas para a estação pluviométrica Usina Fortaleza a partir do emprego da equação (11).

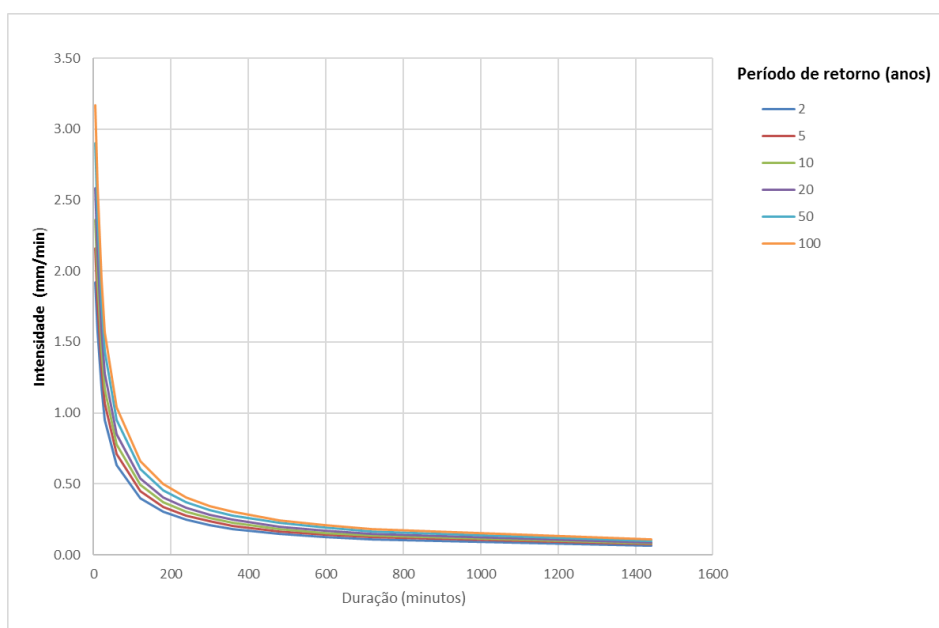


Figura 19 – Curvas intensidade x duração para diferentes períodos de recorrência para a estação pluviométrica Usina Fortaleza.

5.3 TEMPOS DE CONCENTRAÇÃO E HIETOGRAMAS DE PROJETO

A Tabela 9 apresenta os valores de tempo de concentração obtidos para as bacias avaliadas, consideradas suas características fisiográficas e o emprego da fórmula proposta pelo *US Corps of Engineers*.

Tabela 9 - Tempo de concentração obtido para as bacias avaliadas

Unidade hidrográfica	Características fisiográficas				Tc (min)
	Comprimento do talvegue (km)	Altura máxima (m)	Altura mínima (m)	i (%)	
Bacia concentrada	13,43	1140	403	5,47	93,82
Sub-bacia 1	5,36	1140	539	11,21	40,76
Sub-bacia 2	2,81	813	538	9,76	25,58

Uma vez definidos os tempos de concentração para as unidades hidrográficas avaliadas, foram então construídos os hietogramas de projeto para as referidas unidades. A Figura 20 apresenta os hietogramas de projeto produzidos para a sub-bacia 1, considerados períodos de retorno de 10 anos, 50 anos e 100 anos. Hietogramas semelhantes, produzidos para as demais bacias objeto de análise e diferentes períodos de retorno assumidos, estão reunidos no Apêndice 1.

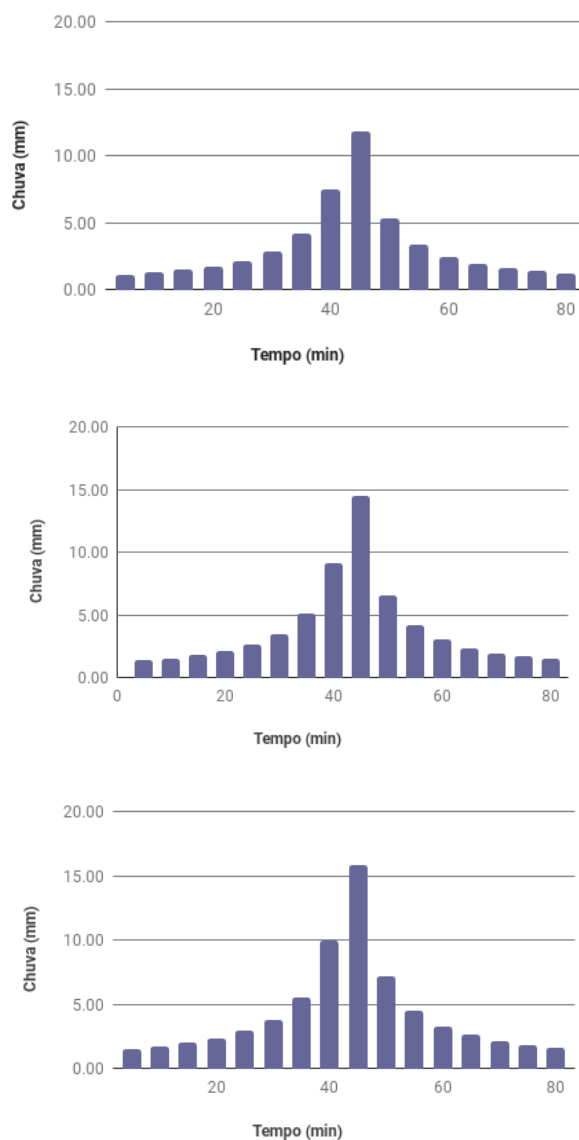


Figura 20 – Hietogramas das chuvas de projeto associadas à sub-bacia 1, considerando períodos de retorno de 10 anos (superior), 50 anos e 100 anos (inferior), respectivamente

5.4 PARÂMETROS PARA MODELAGEM HIDROLÓGICA

Nesta seção estão apresentados os resultados obtidos quando da apropriação dos valores de CN, percentagem de área impermeável e tempo de retardo, requeridos como parâmetros para modelagem hidrológica de cada unidade hidrográfica avaliada.

A Tabela 10 apresenta os valores de CN médio obtidos para a bacia concentrada e diferentes sub-bacias avaliadas.

Tabela 10 - Valores de CN obtidos para as unidades hidrográficas

Unidade hidrográfica	CN médio
Bacia concentrada	55,84
Sub-bacia 1	56,94
Sub-bacia 2	62,45

A Figura 21 apresenta a variação do percentual de área das bacias estudadas (bacia concentrada, sub-bacia 1 e sub-bacia 2) associadas à diferentes valores de CN. Para valores de CN iguais ou superiores a 60, os percentuais de área variam entre 55,5% (sub-bacia 1) e 72,3% (sub-bacia 2). Já para valores de CN iguais ou maiores que 85, os percentuais de área decrescem substancialmente, variando entre 0,03% (sub-bacia 2) e 1,42% (sub-bacia 1).

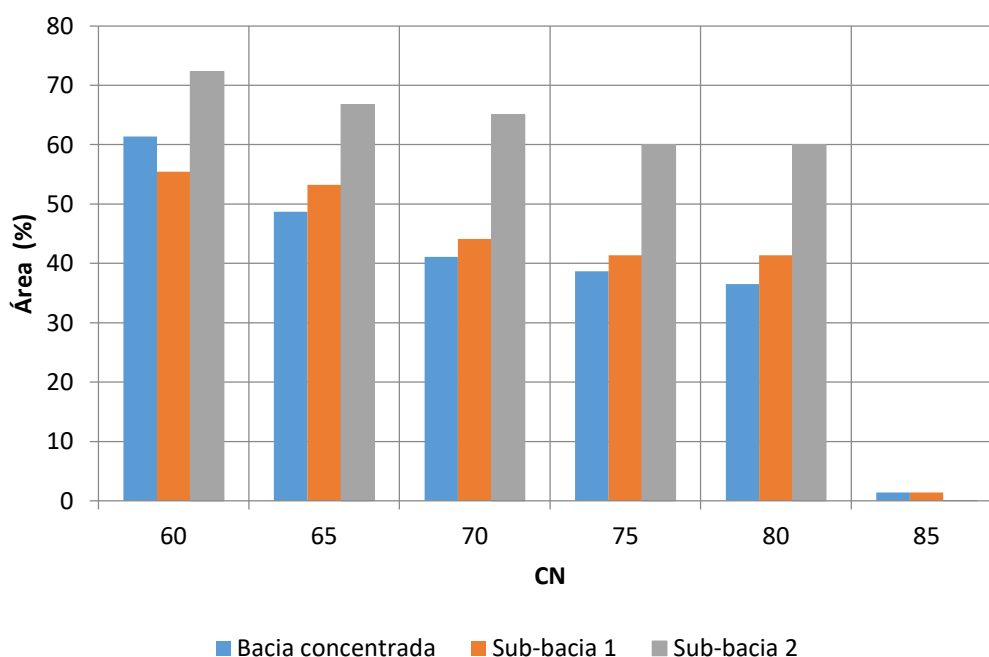


Figura 21 - Variação da área das bacias em função dos valores de CN

Neste contexto, considerando-se os pequenos percentuais de áreas das bacias associados à valores de CN superiores a 85 e a perspectiva de simulações conservadoras do ponto de vista ambiental, as áreas consideradas impermeáveis foram aquelas que apresentaram valores de CN iguais ou superiores a 80. A Tabela 11 sumariza os valores de percentagem de área impermeável assumidos

para as unidades hidrográficas avaliadas. É relevante observar que a sub-bacia 2, porção da área de estudo que apresentou elevado percentual para área impermeável, abarca a maior parte do núcleo urbano do município de Muniz Freire e que seu solo é constituído por Neossolos Litólicos e Afloramentos Rochosos, solos do grupo D (conforme classificação apresentada na Tabela 2), que usualmente apresentam taxas de infiltração muito baixas.

Tabela 11 - Percentagem de área impermeável para as unidades hidrográficas

Unidade hidrográfica	% de área impermeável
Bacia concentrada	36,50
Sub-bacia 1	41,38
Sub-bacia 2	60,00

A partir dos tempos de concentração obtidos, conforme procedimento estabelecido na seção 5.5.2, foram estimados os tempos de retardo para cada uma das regiões hidrográficas. A Tabela 12 apresenta os tempos de retardo apropriados para cada bacia modelada.

Tabela 12 - Tempo de retardo obtido para as unidades hidrográficas

Unidade hidrográfica	Tempo de retardo (min)
Bacia concentrada	56,29
Sub-bacia 1	24,46
Sub-bacia 2	15,35

5.5 RESPOSTA HIDROLÓGICA PARA A BACIA DO RIBEIRÃO VARGEM GRANDE

5.5.1 Vazões de pico e volumes escoados para a bacia Concentrada

A Tabela 13 apresenta as vazões de pico e o volume de escoamento superficial estimados para a bacia do ribeirão Vargem Grande (bacia Concentrada), considerados diferentes períodos de retorno entre 2 e 100 anos. A referida tabela apresenta, adicionalmente, as diferenças relativas entre os modelos SWMM e HEC-HMS, assumindo-se o último como referência para apropriação das diferenças. É relevante observar que os volumes escoados foram apresentados como lâminas d'água (em mm) associadas ao escoamento superficial.

Tabela 13 - Vazão de pico e volume de escoamento superficial estimados para a bacia do Ribeirão Vargem Grande

Período de retorno (anos)	Vazão de pico (m ³ /s)			Volume de Escoamento superficial (mm)		
	SWMM	HEC-HMS	Diferença (%)	SWMM	HEC-HMS	Diferença (%)
2	11,78	5,60	110,36	3,26	1,02	219,61
5	14,02	11,10	26,31	3,69	2,11	74,88
10	15,95	16,70	-4,49	4,05	3,28	23,48
20	18,14	24,40	-25,66	4,44	4,83	-8,07
50	21,48	37,90	-43,32	5,03	7,54	-33,29
100	24,37	51,50	-52,68	5,52	10,17	-45,72

As figuras 22 e 23 apresentam graficamente, para os diferentes períodos de retorno e modelos empregados, os valores de vazão de pico (Figura 22) e volume de escoamento superficial (Figura 23). Nos gráficos apresentados por meio das figuras 22 e 23, as barras de erro representam erros percentuais de 30% no entorno dos valores estimados com auxílio do modelo HEC-HMS. As figuras 24 e 25, por sua vez, apresentam gráficos de dispersão associados às vazões de pico (Figura 24) e volume de escoamento superficial (Figura 25), considerados os valores estimados pelos modelos SWMM e HEC-HMS para as diferentes frequências de ocorrência; estas figuras apresentam, adicionalmente, os coeficientes de correlação obtidos a partir do ajuste de funções lineares que relacionam as referidas variáveis (vazões de pico e volumes escoados superficialmente), estimados com auxílio dos modelos SWMM e HEC-HMS. Já figuras 26 e 27 reúnem os hidrogramas produzidos pelos modelos SWMM e HEC-HMS, respectivamente.

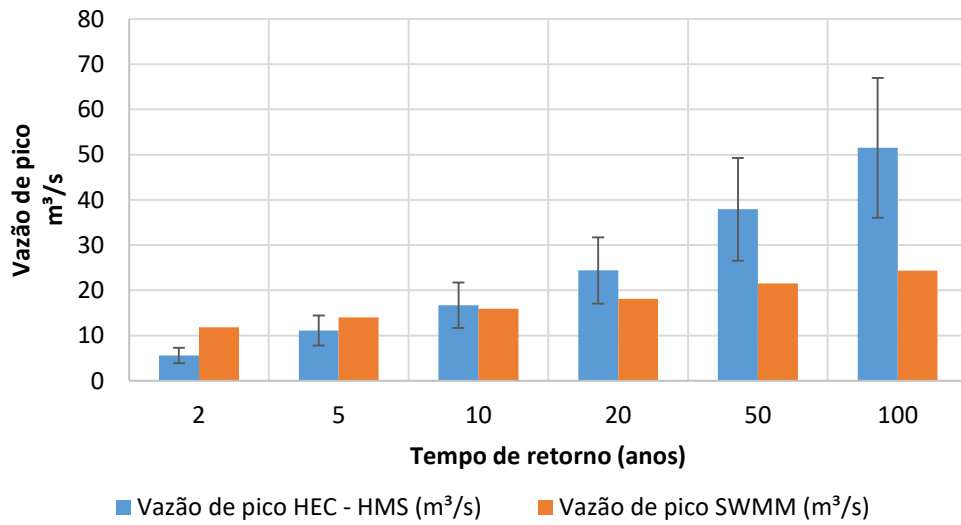


Figura 22 - Vazões de pico estimadas para a bacia concentrada pelos SWMM e HEC-HMS

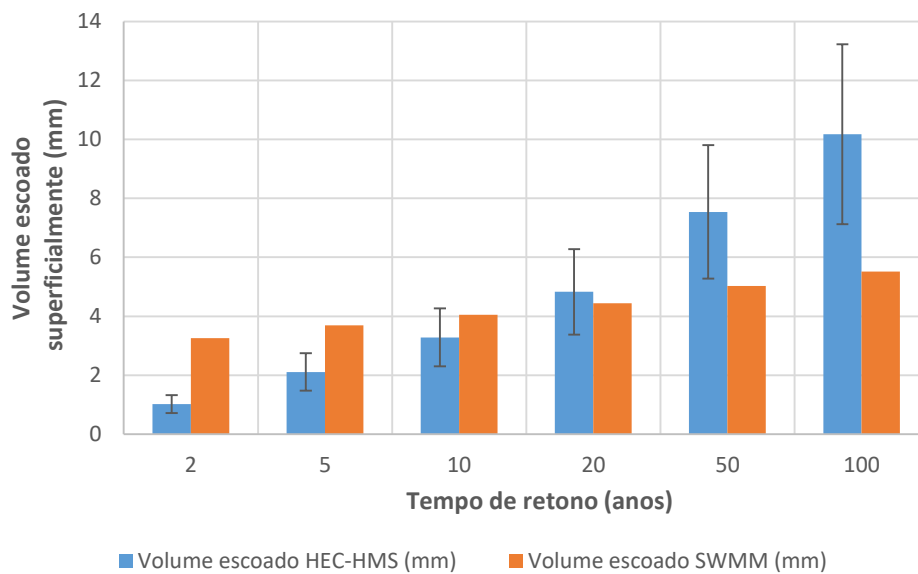


Figura 23 - Escoamento superficial total estimado para a bacia concentrada pelos modelos SWMM e HEC-HMS

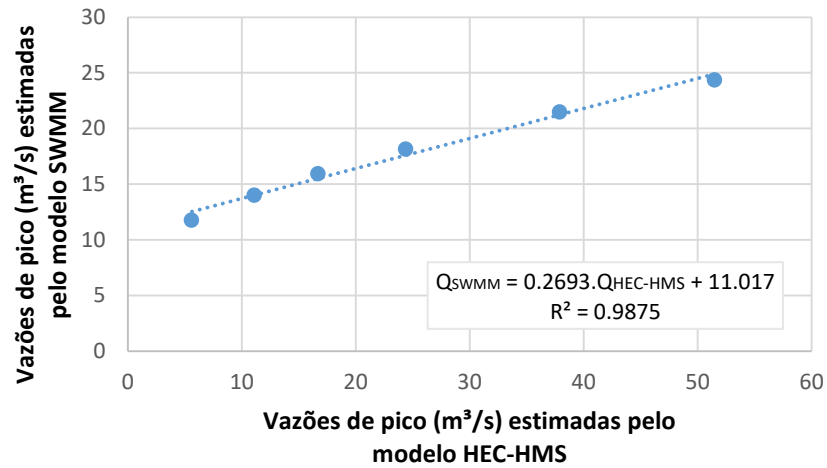


Figura 24 – Gráfico de dispersão para vazões de pico estimadas para a bacia concentrada pelos modelos SWMM e HEC-HMS

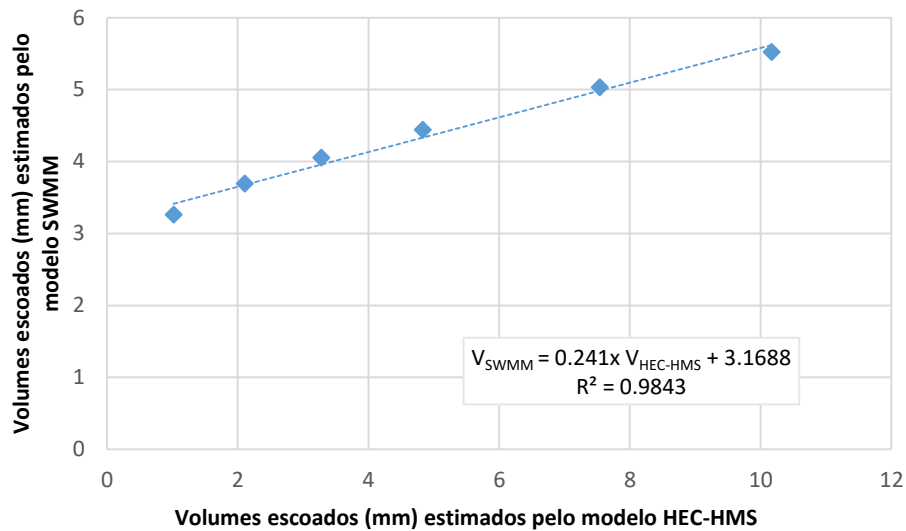


Figura 25 – Gráfico de dispersão para volumes totais escoados superficialmente estimados para a bacia concentrada pelos modelos SWMM e HEC-HMS

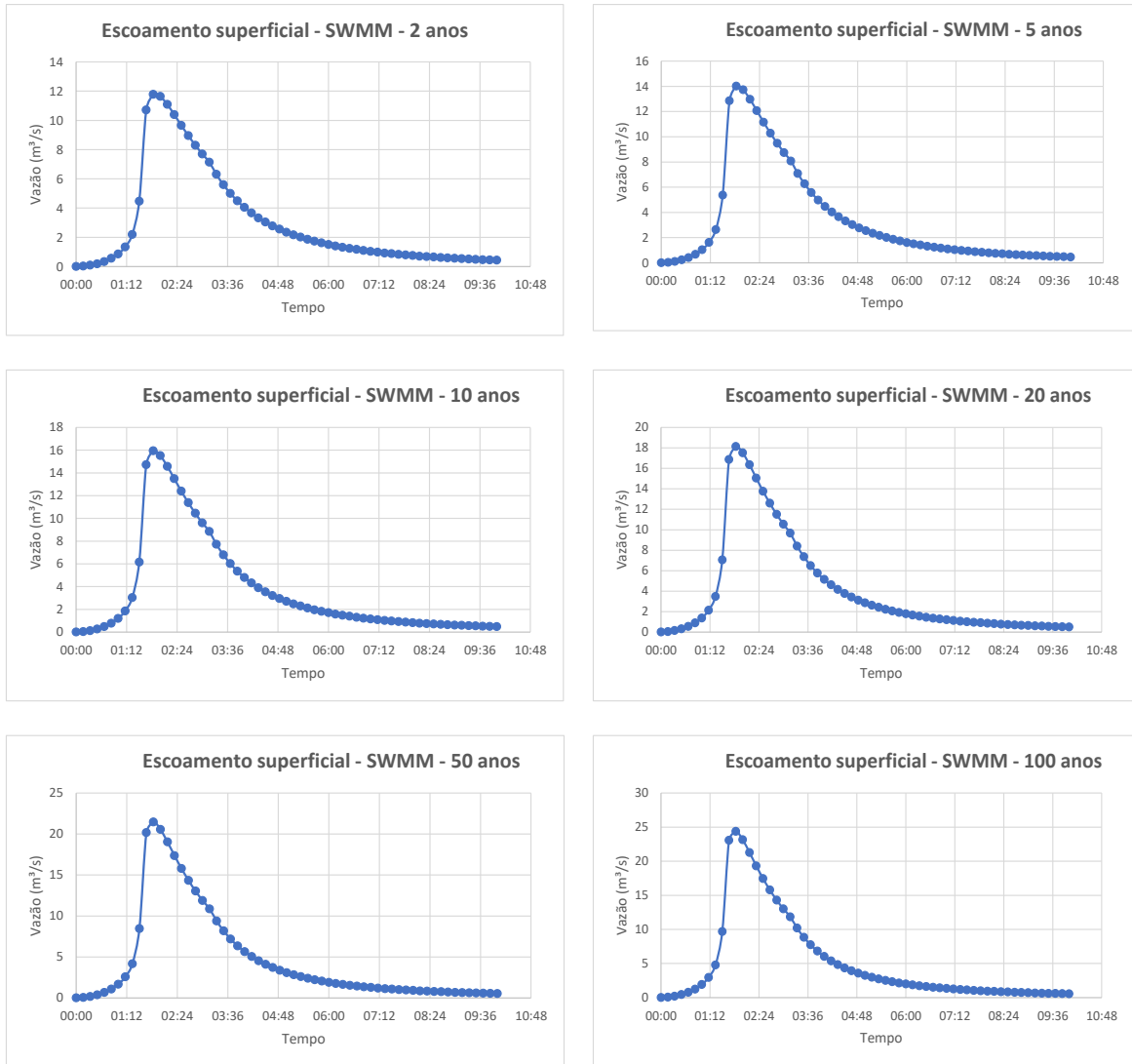


Figura 26 - Hidrogramas produzidos para a bacia concentrada a partir das simulações conduzidas com o modelo SWMM

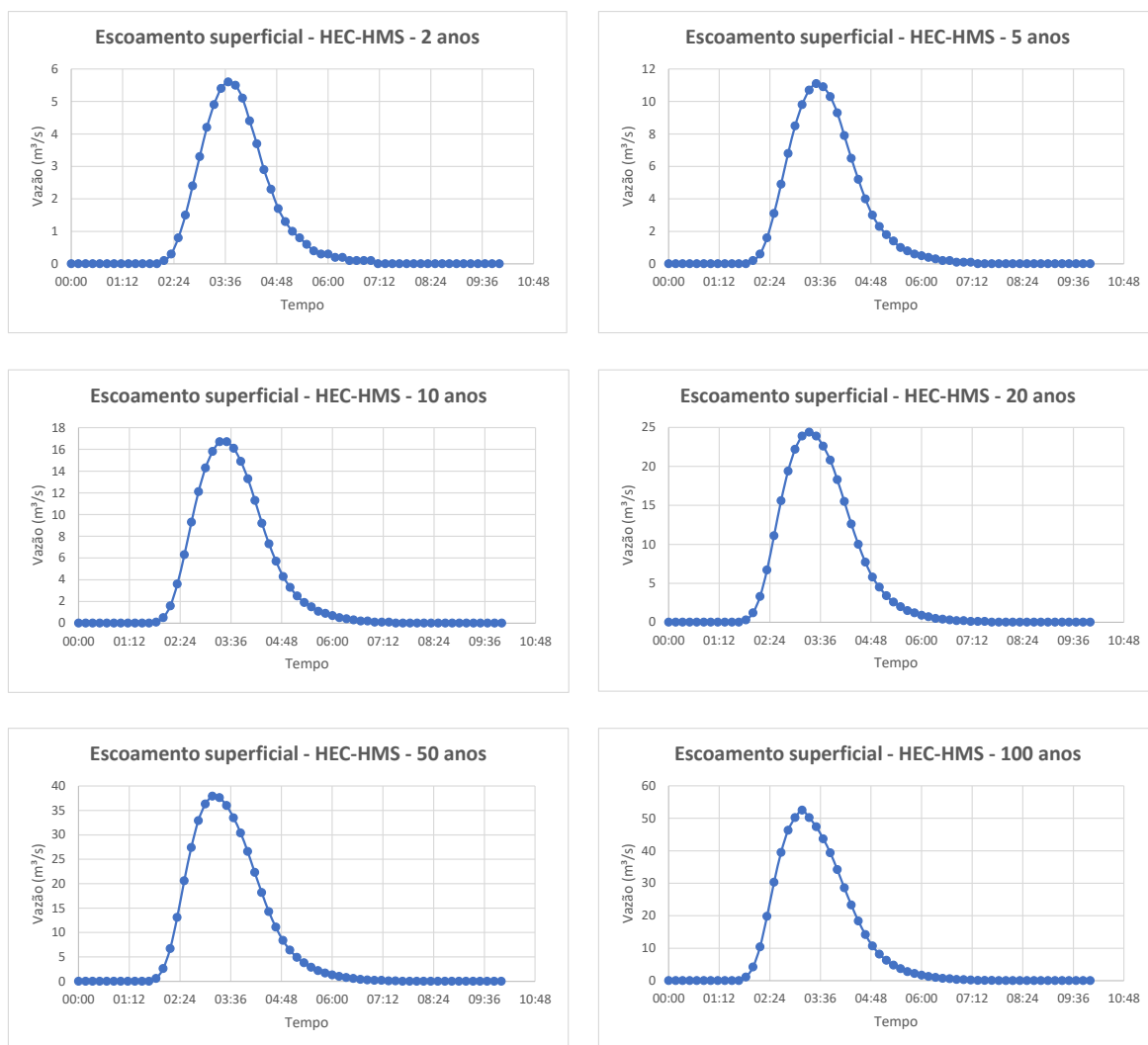


Figura 27 - Hidrogramas produzidos para a bacia concentrada a partir das simulações conduzidas com o modelo HEC -HMS

A partir dos valores reunidos na Tabela 13 e da simples inspeção das figuras de 22 a 27 são consideradas as seguintes considerações:

- As simulações hidrológicas realizadas no SWMM produziram valores de vazão de pico que variaram de 11,78 m³/s (vazões associadas ao período de retorno de 2 anos) até 24,37 m³/s (vazões associadas ao período de retorno de 100 anos), apresentando uma variação com amplitude de aproximadamente 13 m³/s. O modelo HEC-HMS, por sua vez, produziu simulações que resultaram em variações da ordem de 46 m³/s; com o modelo HEC-HMS, as vazões de pico variaram de 5,60 m³/s até 51,50 m³/s, para períodos de retorno de 2 a 100 anos, respectivamente. As menores diferenças relativas entre as vazões de pico estimadas pelos

modelos HEC-HMS e SWMM foram obtidos para os períodos de retorno compreendidos entre 5 e 20 anos, quando apresentaram-se inferiores a 30%. É relevante observar, adicionalmente, que os tempos de picos estimados por meio do modelo SWMM foram invariavelmente inferiores àqueles estimados pelo modelo HEC-HMS.

- Os volumes totais escoados superficialmente estimados com o auxílio do modelo SWMM variaram entre 3,26 mm (lâminas d'água associadas ao período de retorno de 2 anos) e 5,52 mm (lâminas d'água associadas ao período de retorno de 100 anos), apresentando uma variação com amplitude de aproximadamente 2 mm. Para a mesma variação entre períodos de retorno, as simulações conduzidas com auxílio do modelo HEC-HMS produziram variações da ordem de 9 mm (as lâminas d'água que produziram escoamento superficial variaram entre 1,02 mm e 10,17 mm). As menores diferenças relativas entre os volumes totais estimados pelos modelos HEC-HMS e SWMM, foram obtidos para os períodos de retorno de 5 e 20 anos, quando apresentaram-se inferiores a 30%.
- Para as condições de contorno que conformaram as simulações conduzidas no presente estudo, o SWMM estimou, para os menores períodos de retorno, vazões superiores àquelas estimadas por meio do HEC-HMS. Tendência contrária foi observada para os maiores períodos de retorno. Para a bacia concentrada, estimativas foram mais próximas para períodos de retorno de 10 anos, condição na qual a diferença percentual entre as vazões de pico estimadas pelos diferentes modelos foi de aproximadamente 4,5%;
- As vazões de pico e volumes escoados superficialmente estimados pelos modelos SWMM e HEC-HMS apresentam, para as condições de contorno assumidas para a condução das simulações, pronunciada relação linear entre si. Os coeficientes de correlação apresentados nas figuras 29 e 30 apresentaram-se superiores a 98% (98,8% e 98,5% para vazões de pico e volumes escoados superficialmente, respectivamente).
- As equações decorrentes da análise de regressão para as simulações conduzidas para a bacia concentrada indicam a perspectiva de que, para precipitações associadas a pequenos períodos de retorno (inferiores a 2

anos), o modelo HEC-HMS não sugeria a formação de escoamento superficial (nestas condições não seria produzida precipitação excedente e, conseqüentemente, volumes escoados superficialmente). No entanto, para as mesmas condições de contorno, o modelo SWMM estimaria volumes escoados e correspondentes vazões de pico. É relevante registrar que, função da sua estrutura conceitual, o modelo SWMM demanda **a)** que o usuário indique o percentual de área considerada da bacia impermeável (neste estudo, assumiu-se que todas as porções da bacia com valores de CN iguais ou superiores a 80 seriam tratadas como impermeáveis) e **b)** que indique o sentido de escoamento entre áreas permeáveis e impermeáveis (assumiu-se a perspectiva de escoamento a partir de ambas áreas diretamente para o exutório da sub-bacia), aspectos que estão associados a produção do escoamento superficial e que podem condicionar os valores finais estimados pelo modelo.

5.5.2 Vazões de pico e volumes escoados para a Sub-bacia 1

A Tabela 14 apresenta os valores de vazão de pico e volume de escoamento superficial estimados para a Sub-bacia 1 e, adicionalmente, sumariza as diferenças relativas entre os modelos SWMM e HEC-HMS, mantendo-se este último como referência, considerados diferentes períodos de retorno entre 2 e 100 anos. As figuras 28 e 29, por sua vez, representam graficamente os valores de vazão de pico e de volume de escoamento superficial, respectivamente, para os diferentes períodos de retorno avaliados.

Tabela 14 - Vazão de pico e volume de escoamento superficial estimados para a Sub-bacia 1

Tempo de retorno (anos)	Vazão de pico (m ³ /s)			Escoamento superficial (mm)		
	SWMM	HEC-HMS	Diferença (%)	SWMM	HEC-HMS	Diferença (%)
2	3,05	0,33	824,24	1,43	0,06	2283,33
5	3,60	1,88	91,49	1,61	0,38	323,68
10	4,09	3,87	5,68	1,77	0,83	113,25
20	4,63	6,82	-32,11	1,93	1,51	27,81
50	5,45	12,15	-55,14	2,18	2,84	-23,24
100	6,17	17,84	-65,41	2,38	4,23	-43,74

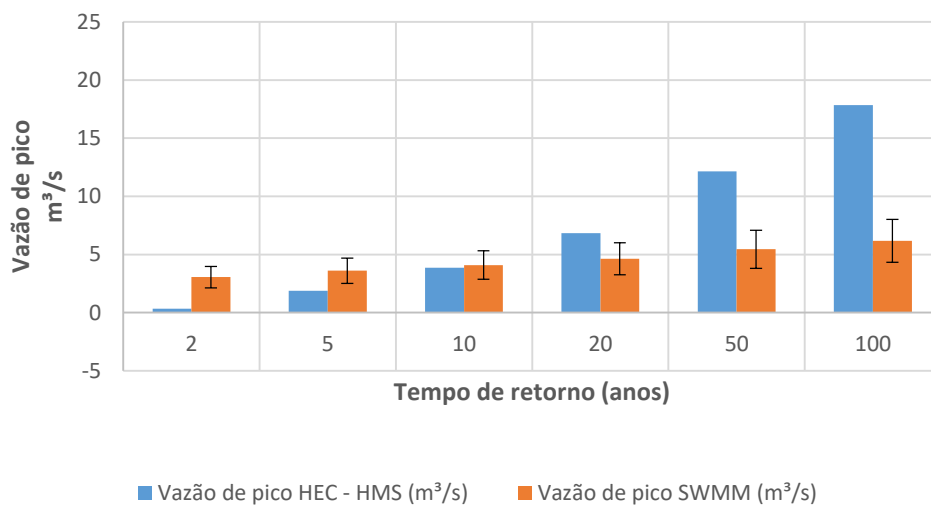


Figura 28 - Vazões de pico estimadas para a sub-bacia 1 pelos SWMM e HEC-HMS

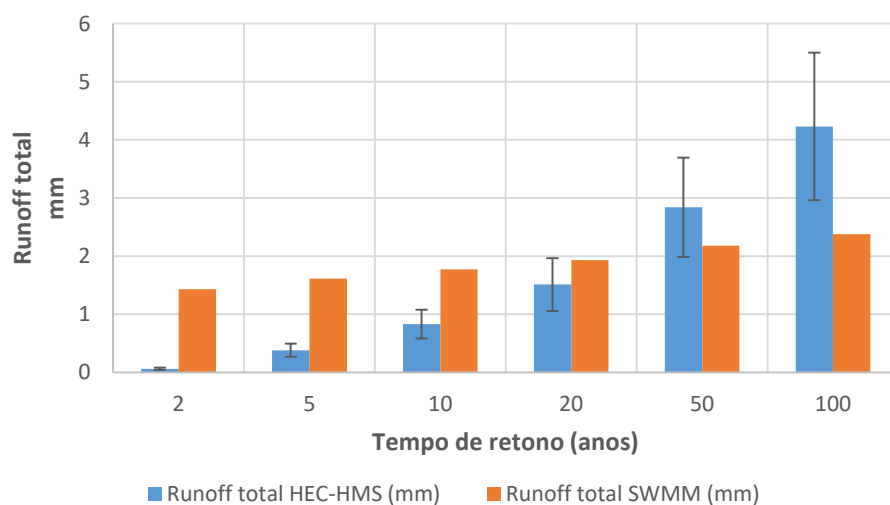


Figura 29 - Escoamento superficial total estimado para a sub-bacia 1 pelos modelos SWMM e HEC-HMS

As simulações hidrológicas realizadas no SWMM para frequências de ocorrência entre 2 e 100 anos resultaram em valores de vazão de pico que variaram entre 3,05 m³/s e 6,17 m³/s, respectivamente, apresentando uma variação com amplitude de aproximadamente 3 m³/s. Já o emprego do modelo HEC-HMS

produziu variações da ordem de 17 m³/s, com valores fluando entre 0,33 m³/s e 17,84 m³/s para as vazões de pico estimadas, consideradas as mesmas frequências de ocorrência. A menor diferença relativa entre as vazões de pico estimadas pelos modelos HEC-HMS e SWMM foi obtido para o período de retorno de 5 anos (diferença ligeiramente inferior a 6%). Para as vazões de picos associadas às demais frequências de ocorrência as diferenças foram invariavelmente superiores a 30%.

Os volumes totais escoados superficialmente, estimados com o auxílio do modelo SWMM e expressos como lâminas d'água, variaram de 1,43 mm, para 2 anos de período de retorno, até 2,38 mm, estabelecendo uma variação com amplitude de aproximadamente 1 mm. O modelo HEC-HMS, por sua vez, produziu simulações que resultaram em variações da ordem de 4 mm para os volumes totais escoados, que variaram de 0,06 mm até 4,23 mm, para períodos de retorno de 2 a 100 anos, respectivamente. Para os volumes totais escoados referentes aos períodos de retorno de 10 e 20 anos as diferenças apresentaram-se inferiores a 30%.

As figuras 30 e 31 apresentam, respectivamente, os gráficos de dispersão associados aos valores de vazão de pico e volume de escoamento superficial obtidos por meio das simulações desenvolvidas nos modelos SWMM e HEC-HMS para as diferentes frequências de ocorrência. Nestas figuras estão também apresentadas as funções lineares que relacionam as referidas variáveis (vazão de pico e volume escoado superficialmente) estimadas pelos diferentes modelos e seus respectivos coeficientes de correlação. Para as condições de contorno que conformam as simulações realizadas para a sub-bacia 1, as vazões de pico e volumes escoados superficialmente estimados pelos modelos SWMM e HEC-HMS apresentam pronunciada relação linear entre si, com coeficientes de correlação superiores a 95% (97,5% e 95,7% para vazões de pico e volumes escoados superficialmente, respectivamente).

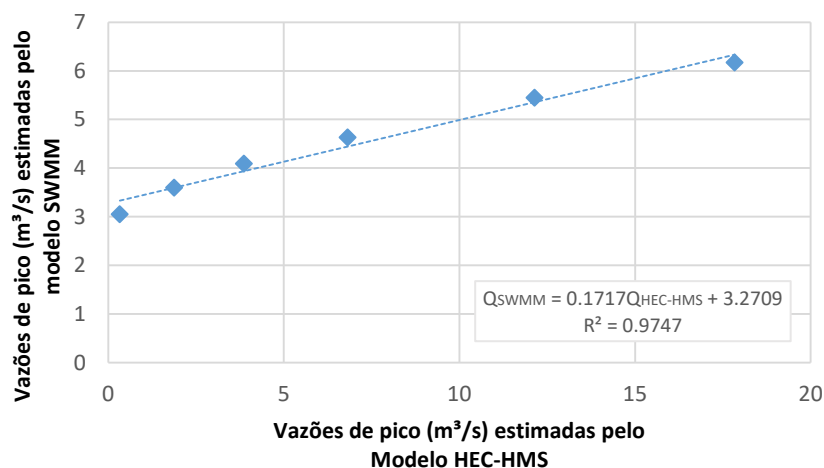


Figura 30 – Gráfico de dispersão para vazões de pico estimadas para a sub-bacia 1 pelos modelos SWMM e HEC-HMS

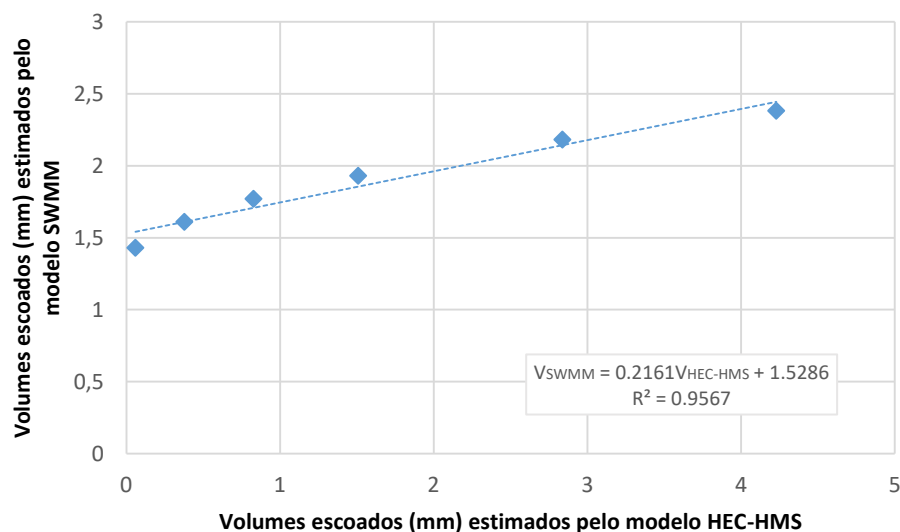


Figura 31 – Gráfico de dispersão para volumes totais escoados superficialmente estimados para a sub-bacia 1 pelos modelos SWMM e HEC-HMS

Nas figuras 33 e 34 estão reunidos os hidrogramas produzidos para o exutório da sub-bacia 1 pelos modelos SWMM e HEC-HAS, respectivamente.

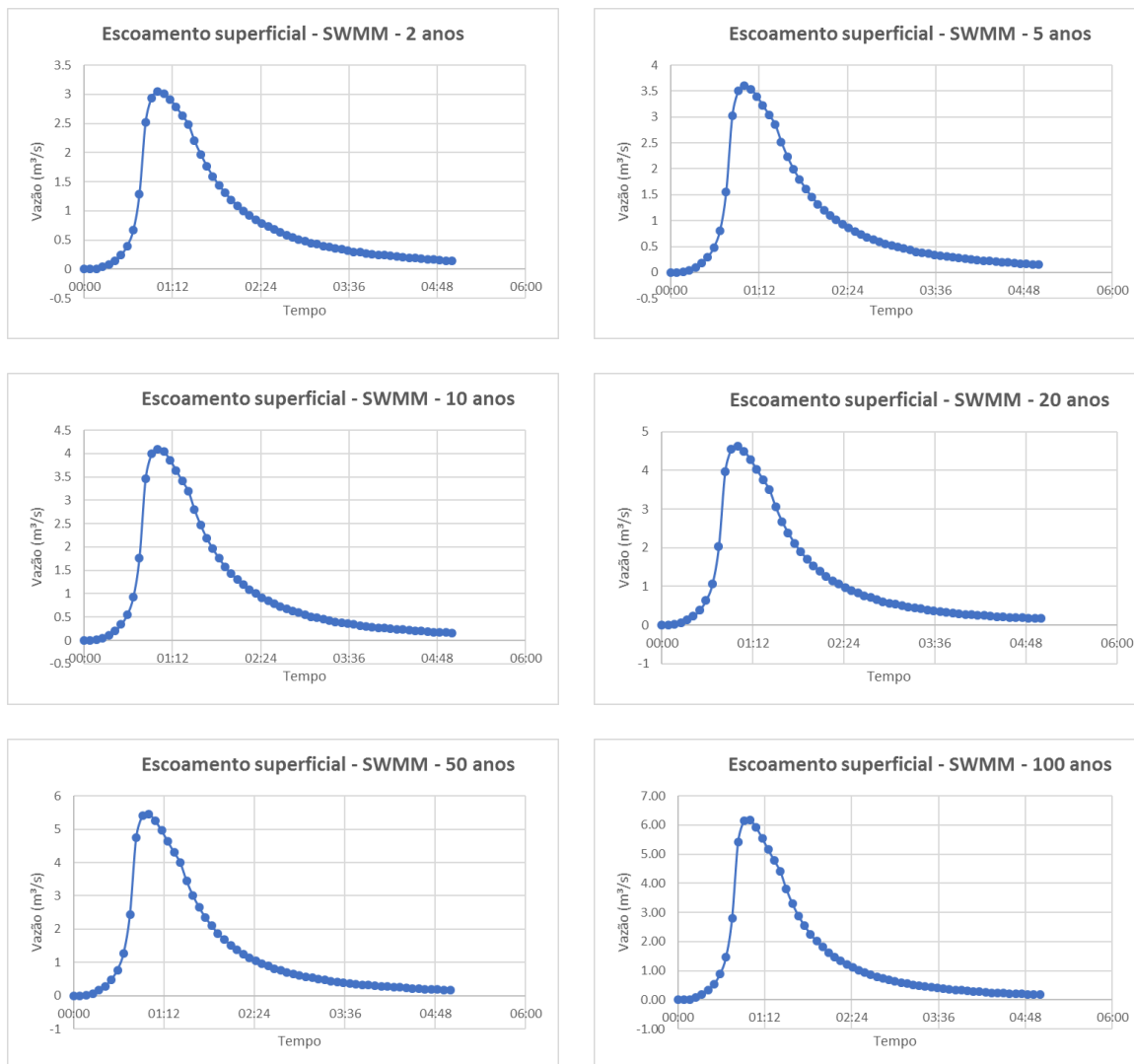


Figura 32 - Hidrogramas produzidos para a sub-bacia 1 a partir das simulações conduzidas com o modelo SWMM

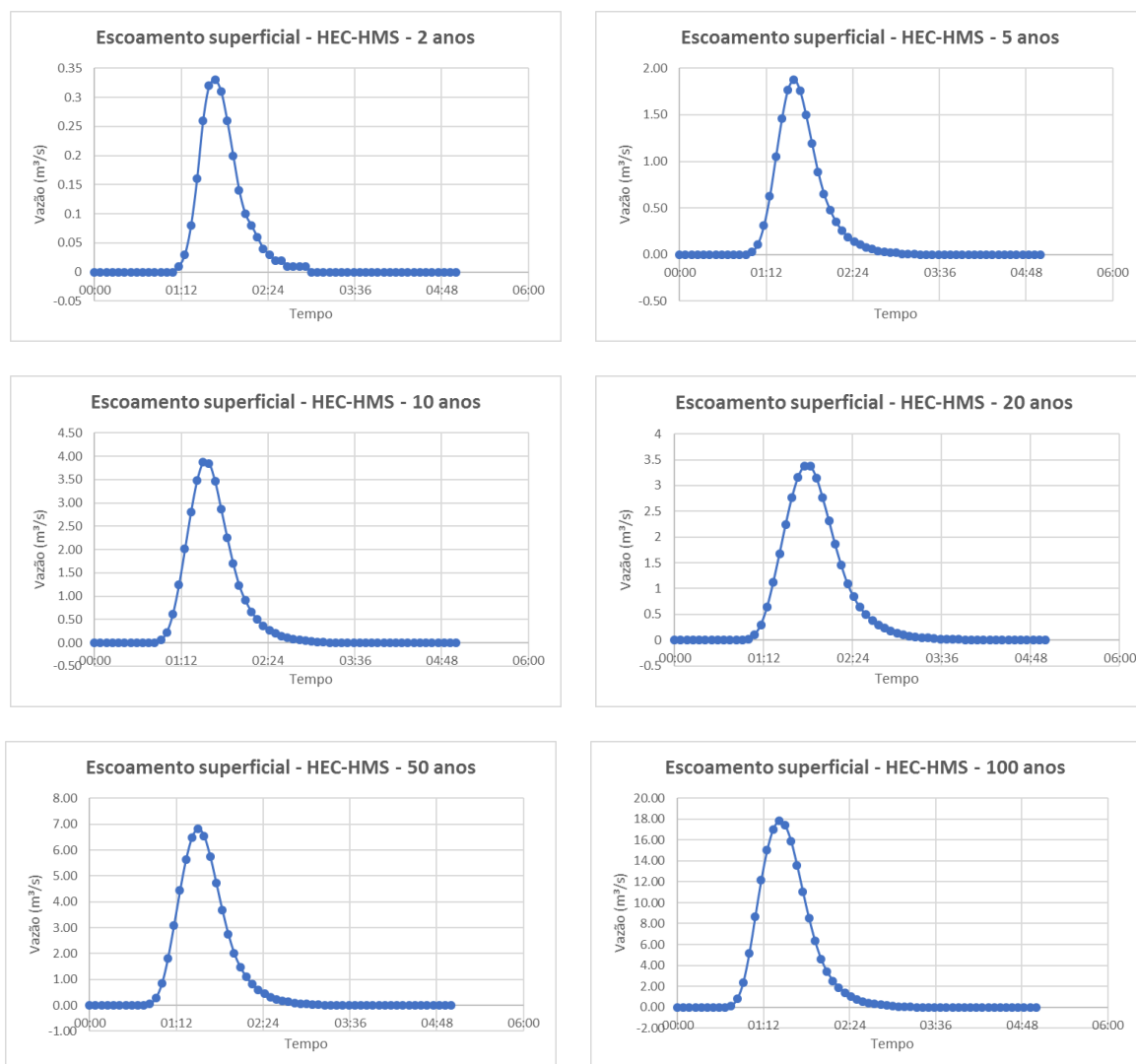


Figura 33 - Hidrogramas produzidos para a sub-bacia 1 a partir das simulações conduzidas com o modelo HEC-HMS

A simples inspeção das duas últimas figuras permite observar a manutenção do padrão estabelecido pelas simulações realizadas para a bacia concentrada. Também para a sub-bacia 1, consideradas as condições de contorno que conformaram as simulações, o modelo SWMM estimou vazões superiores aquelas apropriadas com auxílio do modelo HEC-HMS quando da adoção dos menores períodos de retorno, invertendo-se a tendência com aumento do período de retorno.

5.5.3 Vazões de pico e volumes escoados para a Sub-bacia 2

A Tabela 15 apresenta as vazões de pico e o volume de escoamento superficial estimados para a sub-bacia 2 (majoritariamente urbanizada) considerados

diferentes períodos de retorno entre 2 e 100 anos. A referida tabela apresenta, adicionalmente, as diferenças relativas entre os modelos SWMM e HEC-HMS, assumindo-se o modelo HEC-HMS como referência para apropriação das diferenças.

Tabela 15 - Vazão de pico e volume de escoamento superficial estimado para a Sub-bacia 2

Tempo de retorno (anos)	Vazão de pico (m ³ /s)			Escoamento superficial (mm)		
	SWMM	HEC-HMS	Diferença (%)	SWMM	HEC-HMS	Diferença (%)
2	1.14	0.28	313.04	2.18	0.14	1457.1
5	1.35	1.33	1.50	2.44	0.78	212.82
10	1.54	1.67	-7.78	2.68	1.00	168.00
20	1.75	2.77	-36.82	2.94	1.68	75.00
50	2.07	4.74	-56.33	3.34	2.95	13.22
100	2.35	6.68	-64.82	3.68	4.26	-13.62

As figuras 34 e 35 apresentam graficamente os valores estimados de vazão de pico e volume de escoamento superficial, respectivamente. Assim como nas figuras similares apresentadas nas seções precedentes, as figuras 36 e 37 apresentam as funções lineares que relacionam as variáveis vazões de pico e volumes escoados superficialmente.

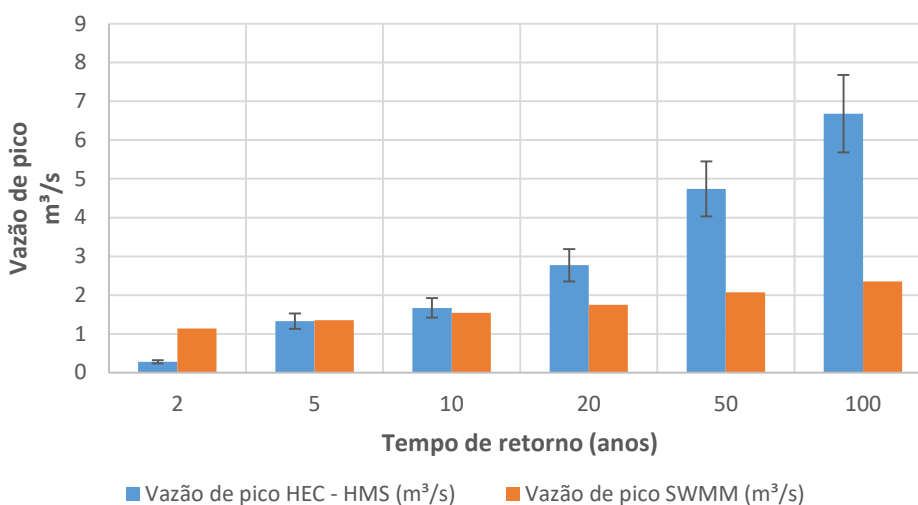


Figura 34 - Vazões de pico estimadas para a sub-bacia 2 pelos SWMM e HEC-HMS

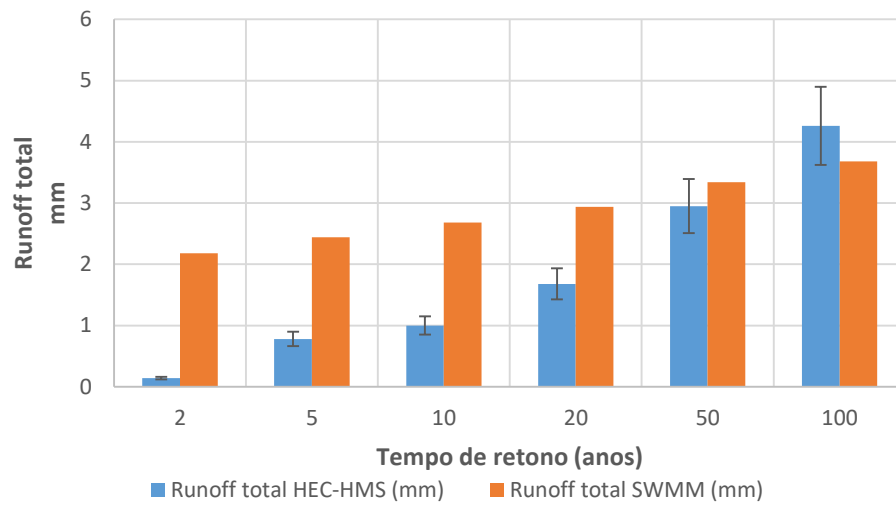


Figura 35 - Escoamento superficial total estimado para a sub-bacia 2 pelos modelos SWMM e HEC-HMS

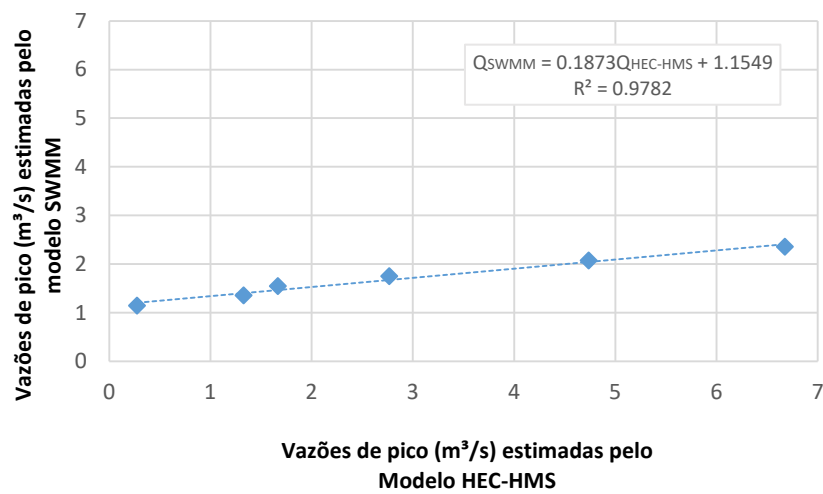


Figura 36 – Gráfico de dispersão para vazões de pico estimadas para a sub-bacia 2 pelos modelos SWMM e HEC-HMS

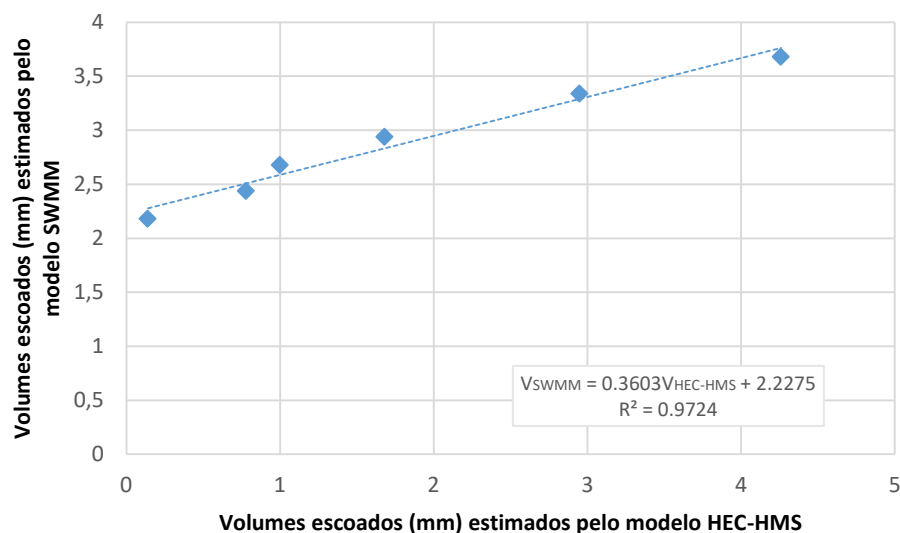


Figura 37 – Gráfico de dispersão para volumes totais escoados superficialmente estimados para a sub-bacia 2 pelos modelos SWMM e HEC-HMS

As figuras 38 e 39, por sua vez, reúnem os hidrogramas produzidos para a sub-bacia 2 a partir das simulações conduzidas pelos modelos SWMM e HEC-HMS.

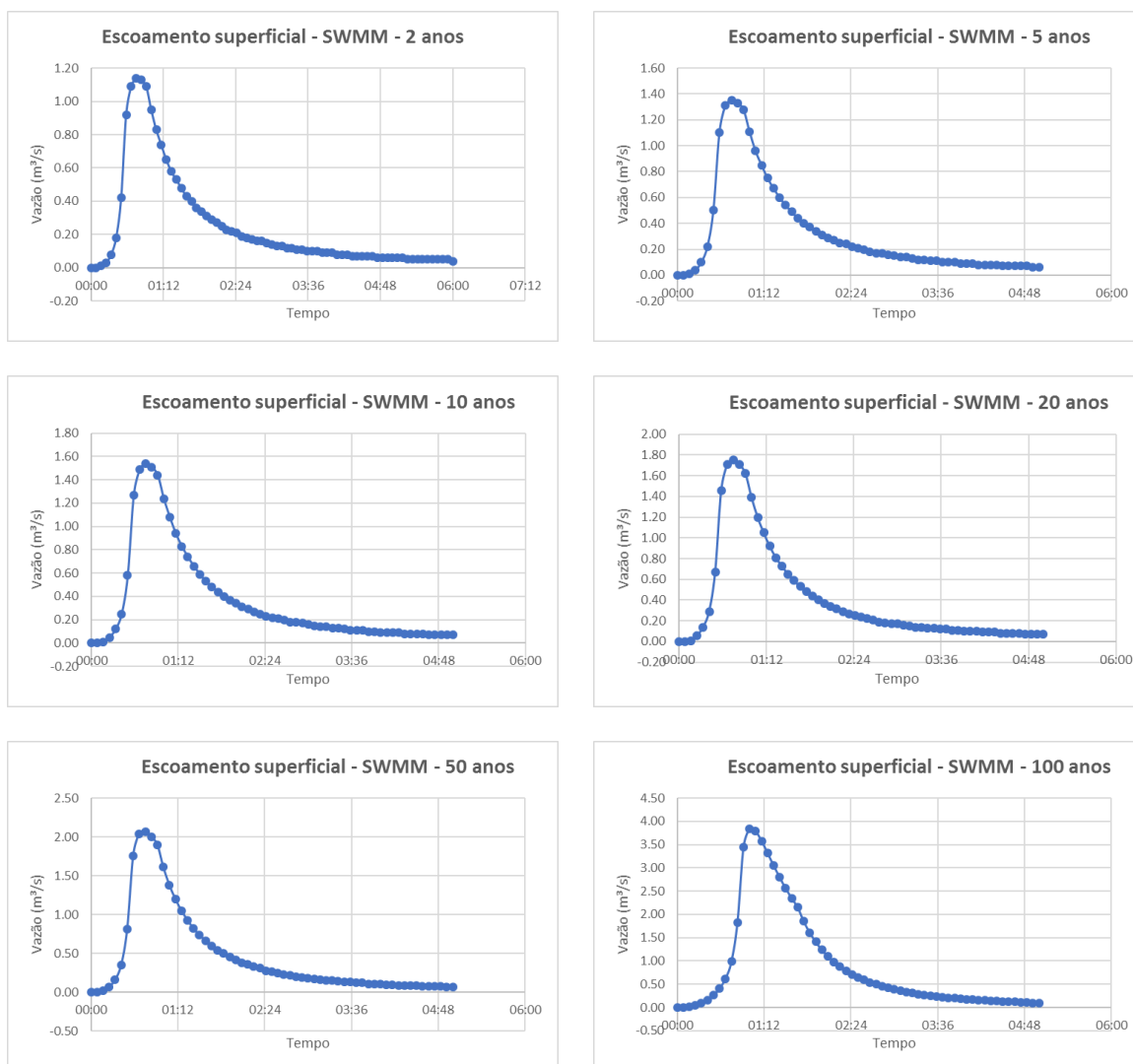


Figura 38 - Hidrogramas produzidos para a sub-bacia 2 a partir das simulações conduzidas com o modelo SWMM

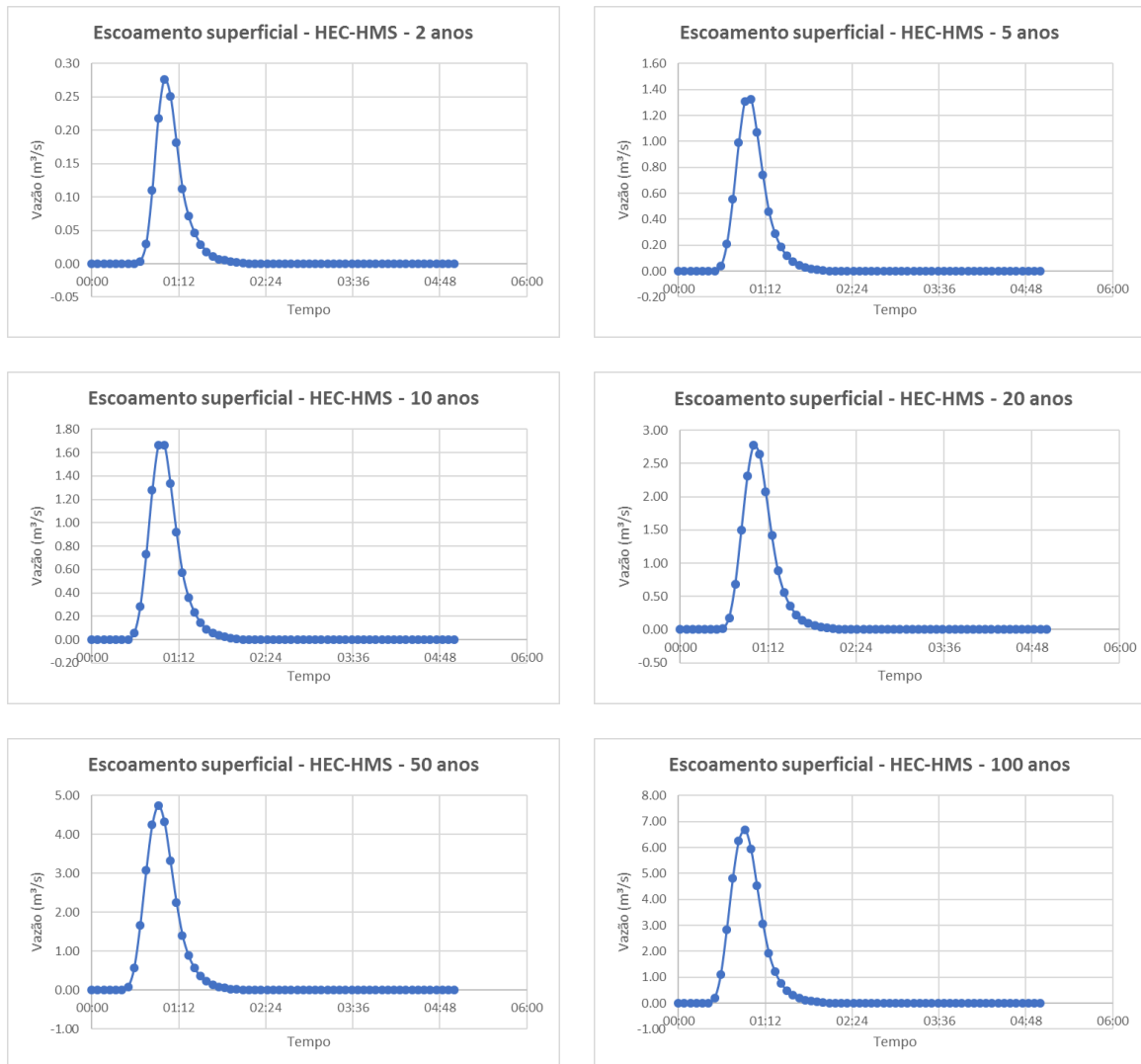


Figura 39 - Hidrogramas produzidos para a sub-bacia 2 a partir das simulações conduzidas com o modelo HEC-HMS

A partir da análise dos valores reunidos na Tabela 14 é relevante observar que os volumes totais escoados superficialmente estimados com o auxílio do modelo SWMM variaram de 2,18 mm, para 2 anos de período de retorno, até 3,68 mm, estabelecendo uma variação com amplitude de aproximadamente 1,5 mm. As simulações conduzidas no HEC-HMS, por sua vez, resultaram em variações da ordem de 4 mm (os valores oscilaram entre 0,14 mm e 4,26 mm, para as frequências de ocorrência entre 2 e 100 anos, respectivamente). As menores diferenças relativas entre os volumes totais estimados pelos modelos foram obtidos para os períodos de retorno de 50 e 100 anos, ambos inferiores a 15%,

ainda que estes volumes sejam derivados de hidrogramas com tempos de pico e formas substancialmente diferentes.

Os valores de vazão de pico variaram de 1,14 m³/s, para 2 anos de período de retorno, até 2,35 m³/s, para 100 anos, apresentando uma variação com amplitude de cerca de 2 m³/s para as simulações realizadas no SWMM. O modelo HEC-HMS, por sua vez, produziu simulações que resultaram em variações da ordem de 6 m³/s, com valores de vazão entre 0,28 m³/s e 6,68 m³/s, para o mesmo intervalo. As menores diferenças relativas entre as vazões de pico estimadas pelos dois modelos foram obtidas para os períodos de retorno compreendidos entre 5 e 10 anos, quando se apresentaram inferiores a 10%.

Para as condições de contorno que conformam as simulações, as vazões de pico e volumes escoados superficialmente estimados pelos modelos SWMM e HEC-HMS apresentam pronunciada relação linear entre si; os coeficientes de correlação apresentados nas figuras 29 e 30 apresentaram-se superiores a 97% (97,8% e 97,2% para vazões de pico e volumes escoados superficialmente, respectivamente).

Para frequência de recorrência de 5 anos, independentemente da porção analisada da área de estudo (bacia concentrada, sub-bacia 1 e sub-bacia 2), observou-se comportamento semelhante ao reproduzido no estudo de Souza *et al.* (2012), realizado para a bacia do córrego Samambaia (Goiânia/GO). No referido estudo, a vazão de pico e o volume de escoamento estimados pelo SWMM apresentaram-se superiores aos estimados pelo HEC-HMS. O tempo de pico no HEC-HMS apresentou defasagem com relação ao produzido no SWMM. É relevante registrar, no entanto, que o estudo conduzido por Souza *et al.* (2012) se limitou ao estabelecimento de vazões associadas à frequência de ocorrência de 5 anos, restringindo o escopo das comparações.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo empregou dois modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão para a conformação de hidrograma, com subsequente apropriação de vazões de pico e volumes escoados superficialmente, para porção do núcleo urbano e região periurbana do município de Muniz Freire. A unidade hidrográfica de análise foi a bacia do Ribeirão Vargem Grande. Adicionalmente, duas sub-bacias do Ribeirão Vargem Grande, com características majoritariamente urbanas ou rurais, foram também analisadas. Considerados os dados de entrada e as condições de contorno que conformaram as simulações conduzidas no presente estudo, as principais conclusões do estudo são assim sumarizadas:

- Os dados fisiográficos e climatológicos utilizados para a caracterização da bacia hidrográfica do Ribeirão Vargem Grande foram obtidos a partir bases de dados de livre domínio gerenciadas pelo IBGE, GEOBASES, ANA e IJSN. A pedologia foi caracterizada a partir de mapa na escala de 1:250.000 (escala que limitou o nível de detalhamento do tipo de solo da área de estudo), o uso e ocupação do solo a partir de ortofotomosaico produzido entre os anos de 2008 e 2010 (não refletindo necessariamente as condições atuais de uso e ocupação do solo) e a equação de chuvas intensas foi estabelecida por procedimento expedito a partir de registros pluviométricos (não foi identificada na bacia hidrográfica ou entorno estação pluviográfica em operação). Estes aspectos constituem limitações para o adequado emprego de modelos chuva-vazão como o SWMM e o HEC-HMS.
- Os modelos HEC-HMS e SWMM apresentam relevantes diferenças nos valores de vazão de pico e volume de escoamento superficial para os períodos de retorno avaliados, independentemente da unidade hidrográfica avaliada. Para tempos de retorno de 2 e 5 anos, os valores de vazão de pico estimados pelo SWMM apresentaram-se maiores do que os valores obtidos no HEC-HMS para todas as bacias avaliadas, invertendo-se esta tendência, com o aumento do tempo de retorno. Para os tempos de retorno de 20, 50 e 100 anos, os valores estimados pelo HEC-HMS passaram a ser maiores do que os obtidos pelo SWMM em todas as bacias avaliadas.

Este comportamento se refletiu no volume escoado superficialmente, que apresentou comportamento semelhante. No entanto, as vazões de pico e volumes escoados superficialmente estimados pelos modelos SWMM e HEC-HMS apresentam pronunciada relação linear entre si;

- Para as três unidades hidrográficas analisadas, as respostas hidrológicas obtidas para período de recorrência de 10 e 20 anos foram as que apresentaram mais próximas, com as menores diferenças relativas para vazões de pico e volumes escoados superficialmente. Esse aspecto é relevante, função dos períodos de retorno usualmente assumidos para estimativa das vazões associadas aos estudos prospectivos e projetos de drenagem urbana.
- O modelo SWMM demanda a definição de uma série de parâmetros exclusivos do modelo para descrição física da área em estudo, dentre os quais destacam-se declividade média da bacia, número de Manning, sentido e largura característica do escoamento e porcentagem de áreas impermeáveis, os quais exercem grande influência sobre os valores de vazões de pico e do escoamento superficial obtidos. O HEC-HMS, por sua vez, concentra as características físicas da bacia nos parâmetros área, CN e tempo de concentração. Assim, observa-se uma maior sensibilidade do modelo SWMM aos fatores físicos da bacia, enquanto o HEC-HMS apresentou-se mais sensível às variações de precipitação. O atraso no tempo de pico dos hidrogramas obtidos pelo HEC-HMS com relação ao SWMM, deve-se, possivelmente, também à maior sensibilidade do modelo SWMM às variações físicas na bacia. A área objeto de estudo apresenta declividades elevadas, o que pode ter sido um fator relevante para uma maior velocidade no escoamento superficial estimado a partir do SWMM.

São consideradas recomendações para estudos posteriores:

- Condução de estudos similares para áreas que apresentem hidrogramas estabelecidos a partir de vazões medidas em campo, permitindo a comparação dos hidrogramas estabelecidos pelos modelos com eventos reais;

- Condução de estudos que considerem diferentes opções para a modelagem das diferentes fases do ciclo hidrológico por meio de modelos chuva-vazão;
- Avaliação das respostas dos modelos SWMM e HEC-HMS para áreas com características distintas da área objeto deste estudo, como área, uso e ocupação do solo, tipo de solo e regime pluviométrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABUSHANDI, E.; MERKEL, B. Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. **Water Resources Management**, Arábia Saudita, v. 27, n. 7, p. 2391-2409, 2013.
- BELL, F. C. Generalized rainfall-duration-frequency relationships. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v. 95, n. 1, p. 311-327, 1969
- BEMFICA, D. C.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. L. Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 5-16, 2000.
- BOULOMYTIS, V. T. G. Modelagem e simulação no âmbito da hidrologia. **Revista Agrogeoambiental**, v.3, n. 1, p. 311-327, 2011.
- CABRAL, S. L.; CAMPOS, J. N. B.; SILVEIRA, C. S.; TEIXEIRA, F. A. A. Hydrologic and hydraulic modelling integrated with GIS: a study of the Acaraú river basin – CE. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, Ceará, v. 8, n. 2, p. 167-174, 2015.
- CABRAL, J. J. S. P.; MASCARENHAS, F. B.; CASTRO, M. A. H.; MIGUEZ, M. G.; PEPLAU, G. R.; BEZERRA, A. A. Modelos computacionais para drenagem urbana. In: RIGHETTO, A. M. (Coord.). **Manejo de águas pluviais urbanas**. Rio de Janeiro: ABES, 2009, 396 p.
- CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. **Hidrologia: Bacia Hidrográfica** (Apostila). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006, 135 p.
- CARVALHO, M. **Calibração de modelos de drenagem urbana utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo**. 2011. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente), Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.
- CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 2ª edição, 302 p.
- CETESB. **Drenagem Urbana – Manual de Projeto**. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1986, 468 p.
- CHABAEVA, A.; CIVCO, D. L.; HURD, J. D. Assistentment of impervious surface estimation techniques. **Journal of hydrology Engineering**, v. 14, n. 4, p. 377-387, 2009.
- COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia**. Porto Alegre: UFRGS/IPH, 2008, 151 p.
- COSTA, M. E. L. **Monitoramento e modelagem de águas de drenagem urbana na bacia do Lago Paranoá**. 2013. 146 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Departamento de engenharia ambiental e civil da Universidade de Brasília. Brasília, 2013.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999, 236 p.

CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. Avaliação dos cenários de planejamento na drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p. 59-71, 2008.

CUNHA, A. C.; CUNHA, H. F. A.; PINHEIRO, L. A. R. Modelagem e simulação do escoamento e dispersão sazonais de agentes passivos no rio Araguari/ AP: Cenários para o AHE Ferreira Gomes – Amapá/Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 18, n.1, p. 67-85, 2013.

FARIA, N. O.; BARBASSA, A. P.; SILVEIRA, A. Monitoramento, modelagem e simulação de cenários para a bacia do córrego Barbado. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n.1, p. 165-176, 2014.

GARCIA, J. I. B. 2005. 169 f. **Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia hidrográfica do Arroio Cancela**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de engenharia civil da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005 apud VILLANUEVA, A.O.N. **Modelo para escoamento não-permanente em uma rede de condutos**. 1990. 83f. Dissertação (Mestrado em engenharia de Recursos Hídrico e Saneamento Ambiental) – Departamento de Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.

GARCIA, J. I. B. 2005. 169 f. **Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia hidrográfica do Arroio Cancela**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

GICHAMO, T. Z. POPESCU, I.; JONOSKI, A.; SOLOMATINE, D. River cross-section extraction from the ASTER global DEM for flood modeling. **Environmental Modelling Software**, v.31, n. 5, p. 37-46, 2012.

GHODSI, S. H.; KERACHIAN, R.; ZAHMATKESH, Z. A multi-stakeholder framework for urban runoff quality management: Application of social choice and bargaining techniques. **Science of the Total Environment**, v. 550, s.n., p. 574-585, 2016.

GOMES, A. P.; PAIVA, E. M. D. Acumulação e transporte de sedimentos na microdrenagem: monitoramento e modelagem. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 15, n. 4, p. 45-55, 2010.

GONTIJO, N. T. **Avaliação das Relações de Frequência entre Precipitações e Enchentes Raras por Meio de Séries Sintéticas e Simulação Hidrológica**. 2007. 175 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ. **Manual de drenagem urbana da região metropolitana de Curitiba**. Paraná. 2002, 130 p.

GRACIOSA, M. C. P. **Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão de risco de inundações**. 2010. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A.; ARCANGELETTI, E.; NARDI, F. Flood mapping in ungauged basins using fully continuous hydrologic-hydraulic modeling. **Journal of Hydrology**, Itália, v. 487, s. n., p. 39-47, 2013.

GYAWALI, R.; WATKINS, D. W. Continuous hydrologic modeling of snow-affectes watersheds in the Great Lakes basin using HEC-HMS. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 1, p. 29-39, 2013.

HABERLANDT, U.; RADTKE, I. Hydrological model calibration for derived flood frequency analysis using stochastic rainfall and probability distributions of peak flows. **Hydrology and Earth System Sciences**, Germany. v. 18, s.n., p. 353-365, 2014.

HAILE, A. T.; TEFERA, F. T.; RIENTJES, T. Flood forecasting in Niger-Benue basin using satellite and quantitative precipitation forecast data. **International Journal of Applied Earth Observation**. v. 52, s. n., p. 475-484, 2016.

HALWATURA, D.; NAJIM, M. M. M. Aplication of HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. **Environmental Modelling & Software**, v.46, s.n., p.155-162, 2013.

HOLLANDA, M. P.; CECÍLIO, R. A.; CAMPANHARO, W. A.; ZANETT, S. S.; ANDRADE, L. N.; GARCIA, G. O. Avaliação do TOPMODEL na estimativa do escoamento superficial em microbacia hidrográfica em diferentes usos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 5, p. 489-496, 2015.

HUNUKUMBURA, P.B.; TACHIKAWA, Y.; SHIIBA, M. Distributed hydrological model transferability across basins with diferente hydro-climatic characteristics. **Hydrological Processes**, Japão, p. 793-808, 2011.

IBGE. **Muniz Freire**. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br>. 2010. Acesso em jun. 2016.

INCAPER. **Programa de Assistência técnica e extensão rural PROATER 2011-2013**. Espírito Santo, 2011, 24 p.

INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES. **Perfil Municipal – Caparaó, Muniz Freire**. Espírito Santo. 2009. Disponível em:<<http://www.ijsn.es.gov.br>> Acesso em abr. 2017.

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS (IPH) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Plano Diretor de Drenagem Urbana Manual de Drenagem Urbana** - Volume VI. Porto Alegre, 2005, 167 p.

JAMES, W.; HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E.; PITT, R. E.; JAMES, W. R. C.; ROSENER, L. A.; ALDRICH, J. A. **User's Guide to SWMM 5**. Canada. CHI, Guelph, Ontario. 2008.

_____. **User's Guide to SWMM**. Canada. 2013, 947 p.

JANZEN, J. G. **Modelos matemáticos e método numéricos em recursos hídricos**. São Carlos: USP – Departamento de Hidráulica e Saneamento, 2007. Material didático, disponível em: <<http://albatroz.shs.eesc.usp.br/home.html>> Acesso em abr. 2017.

KAISER, I. M. **Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos**. 2006. 400 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

KAMALI, B.; MOUSAVI, S. J.; ABBASPOUR, K. C. Automatic calibration of HEC-HMS using single-objective and multi-objective PSO algorithms. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 26, p. 4028-4042, 2013.

KREBS, G.; KOKKONEN, T.; VALTANEN, M.; SETALA, H.; KOIVUSALO, H. Spatial resolution consideration for urban hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, Finlândia, v. 512, s/n, p. 394-410, 2014.

KANG, K.; MERWADE, V. Development and application of a storage-release based distributed hydrologic model using GIS. **Journal of Hydrology**, West Lafayette, v. 403, s. n., p. 1-13, 2011.

LAOUACHERIA, F.; MANSOURI, R. Comparison of WBNM and HEC-HMS of runoff hydrograph prediction in a small urban catchment. **Water Resources Management**, v. 29. s.n., Argeria, p. 2489-2501, 2015.

LEVINE, D.M.; STEPHAN, D.; KREHBIEL, T.C.; BERENSON, M.L. **Estatística – Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2005, 752 p.

LIQING, L.; ALLEN, P. D. Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems. **Environmental Science and Technology**, v. 48. n. 6, p.3403-3410, 2014.

LIU, J.; SAMPLE, D. J.; BELL, C.; GUAN, Y. Review and research need of bioretention udes for the treatment of urban stormwater. **Water**, Virginia, v. 6, s/n, p. 1069-1099, 2014.

MCCUEN, R. H.; WONG, S. L.; RAWLS, W. J. Estimating urban time of concentration. **Journal Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 110, n. 7, p. 887-904, 1994.

MEENU, R.; REHANA, S.; MUJUMDAR, P. P. Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga-Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM. **Hydrological Processes**, India, v. 27, n. 11, p. 1572-1589, 2013.

MELLER, A.; DE PAIVA, E. M. C. D. Simulação hidrodinâmica 1D de inundações em sistema de drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, p. 81-92, 2007.

MULLER, A. S. **Aplicabilidade de medidas estruturais e não-estruturais no controle de cheias urbanas: estudo de caso Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira - Joinville - SC**. 2011. 239 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

NAKAYAMA, P. T.; MENDES, J. B.; LOBO, G. A.; SILVEIRA, G. M. Avaliação do parâmetro CN do método de Soil Conservation Service (SCS) na bacia do Ribeirao dos Marins e Córrego Bussocaba – Estado de São Paulo. **Anais..XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, 2013. 15 p.

- OCCHINPINTI, A. G., SANTOS, P. M. **Relação entre as precipitações de “Um dia” e “24 horas” na cidade de São Paulo**. São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico – USP, 1967, 40 p.
- ORTIZ, J. C. R.; MUÑOZ, M. F. Diseño hidráulico de sistemas de drenaje dual a través del modelo SWMM. **Ingeniería Hidráulica y Ambiental**, Venezuela, v. 14, n. 2, p. 103-117, 2013.
- OUYANG, W.; GUO, B.; HAO, F.; HUANG, H.; LI, J.; GONG, Y. Modeling urban storm rainfall runoff from diverse underlying surfaces and application for control design in Beijing. **Journal of Environmental Management**, China, v. 113, s/n, p. 110-119, 2012.
- PARK, S.Y.; LEE, K. W.; PARK, I. H.; HA, S. R. Effect of the aggregation level of surface runoff fields and sewer network for a SWMM simulation. **Desalination**, v.226, s. n., p. 328-327, 2008.
- PAWAR, D. B.; PRAVENDRA, K.; PRADIP, K. Rainfall-runoff modeling using fuzzy technique for a small watershed in Maharashtra, India. **Internacional Journal of Engineering and management sciences**, India, v. 4, n. 3, p. 388-394, 2013.
- PFAFSTETTER, O. **Chuvas Intensas no Brasil**. Rio de Janeiro: DNOS, 1957, 426 p.
- PINHEIRO, V. B.; NAGHETTINI, M. Calibração de um modelo chuva-vazão em bacia sem monitoramento fluviométrico a partir de curvas de permanência sintéticas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 15, n.2, p. 143-156, 2010.
- PORTO, R. L. L. **Escoamento superficial direto**. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, v. 5, 1995, 414 p.
- RAI, P. K.; CHAHAR, B. R.; DHANYA, C. T. GIS-based SWMM model for simulating the catchment response to flood events. **Hydrology Research**, v. 48, n. 3, p. 384-394, 2016.
- RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. O.; SILVA, E. R. Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Uma em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 394-403, 2015.
- RIBEIRO NETO, A., BATISTA, L. F. D. R.; COUTINHO, R. Q. Metodologias para geração de indicadores de perigo e áreas inundáveis: Município de Ipojuca/PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 377-390, 2016.
- RIBEIRO, C. B. M.; LIMA, R. N. S. Simulação de inundações urbanas a partir da integração de técnicas de geoprocessamento à modelagem hidráulica e hidrológica. **Revista Geografia**, v.2, n. 1, p. 1-9, 2011.
- RIGHETTO, A. M. (Coord.). **Manejo de águas pluviais urbanas**. Rio de Janeiro: 2009, 396 p.
- RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. M.; MENDONÇA, L. A. R.; ARAÚJO, J. C.; PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO, E. M. Respostas hidrológicas em pequenas bacias

na região semiárida em função do uso do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 3, p. 312-318, 2013.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model. Version 5.0**. National Risk Management Research Laboratory, United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio. 2010, 295 p.

SARTORI, A. M.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 19-29, 2005.

SANTOS, F. M.; LOLLO J. A. Cartografia digital para estimativa de escoamento superficial visando ao planejamento urbano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 4, p. 663-675, 2016.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 115-123, 2010.

SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 2, n. 3, p. 1-19, 2009.

SCS-USDA. **Urban hydrology for small watersheds**. TR-55. 1986.164 p.

SHARIFAN, R. A.; ROSHAN, A.; AFLATON, M.; JAHEDI, A.; ZOLGHADR, M. Uncertainty and sensitivity analysis of SWMM model in computation of manhole water depth and subcatchment peak. **Procedia**, v. 2, s.n., 2010.

SHINMA, T. A. **Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada à transformação chuva-vazão**. 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SHUSTER, W. D.; PAPPAS, E. Laboratory simulation of urban runoff and estimation of runoff hydrographs with experimental curve numbers implemented in USEPA SWMM. **Journal of Irrigation and drainage engineering**, v. 137, n. 6, p. 161-169, 2011.

SILVA, D. P.; PRUSKI, F. F.; SILVA, J. M. A.; MEIRELES FILHOS, W. D. M. Comparative analysis of models for design of infiltration basins in unpaved roads. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 6, p. 624-631, 2012.

SILVA, M. M. G. T.; WEERAKOON, S. B.; HERATH, S. Modeling of Event and Continuous Flow Hydrographs with HEC-HMS: Case study in the Kelani River Basin, Sri Lanka. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 4, p. 800-806, 2014.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 5-23, 2005.

SIQUEIRA, V. A.; SORRIBAS, M. V.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; LISBOA, A. M. V.; TRINIDAD, G. G V. Real-time updating of HEC-RAS model for streamflow forecasting using optimization algorithm. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 855-870, 2016.

SOUZA, J. C. **Influência dos registros fisiográficos e das alternativas de modelagem de processos hidrológicos na determinação de vazões de projeto**. 2017. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável), Vitória, 2017.

SOUZA, V. C. B. Gestão da drenagem urbana no Brasil: desafios para a sustentabilidade. **GESTA**, Alagoas, v.1, n.1, p. 57-72, 2013.

SOUZA, R. M.; CRISPIM, D. C.; FORMIGA, K. T. M. Estudo comparativo entre modelos SWMM e HEC-HMS para simulação des escoamento superficial - Caso de estudo bacia do córrego Samambaia. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 5, n.2, p. 1-11, 2012.

SOUZA, R. M.; CRISPIM, D. C.; FORMIGA, K. T. M. Estudo comparativo entre modelos SWMM e HEC-HMS para simulação des escoamento superficial - Caso de estudo bacia do córrego Samambaia. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 5, n.2, p. 1-11, 2012. apud MILDE, L. C. E. et al. Modelo espaço-temporal HEC-HMS: avaliação na bacia de drenagem de Analândia. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 10, n. 19, p. 61-69, 2002.

TAHMASBINEJAD, H.; FEYZOLAHPOUR, M.; MUMIPOUR, M.; ZAKERHOSEINI, F. Rainfall-runoff simulation and modeling of Karun river using HEC-RAS and HEC-HMS models, Izeh District, Iran. **Journal of Applied Sciences**, v. 12, s.n., p. 1900-1908, 2012.

TEIXEIRA, C. F. A.; DAMÉ, R. C. F.; SIQUEIRA, G. A.; BACELAR, L. C. S. D. Vazão máxima de projeto: metodologia para dimensionamento de bueiros em obras agrícolas. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Pelotas, n.17, p. 49-56, 2011.

TRIPATHI, R.; SENGUPTA, S. K. Climate change, urban development, and community perception of an extreme flood: A case study of Vernonia, Oregon, USA. **Applies Geography**, v.46, s. n., p. 137-146, 2014.

TUCCI, C. E. M. Plano director de drenagem urbana: princípios e concepção. **Revista Brasileira de Recursos hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 5-20, 1995.

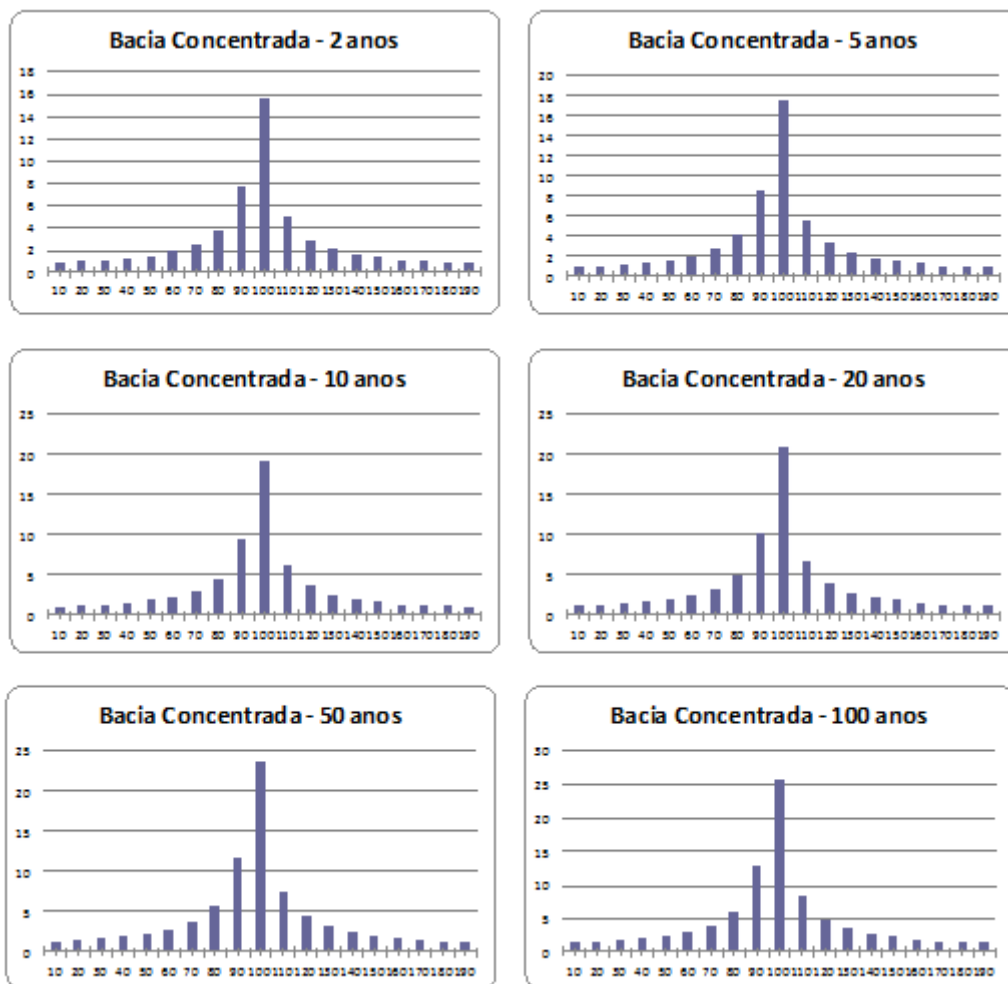
TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Rio Grande do Sul: UFRGS, 2005. 678 p.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, C. (Org.). Inundações Urbanas na América do Sul. Porto Alegre: **ABRH**, 2003. 147 p.

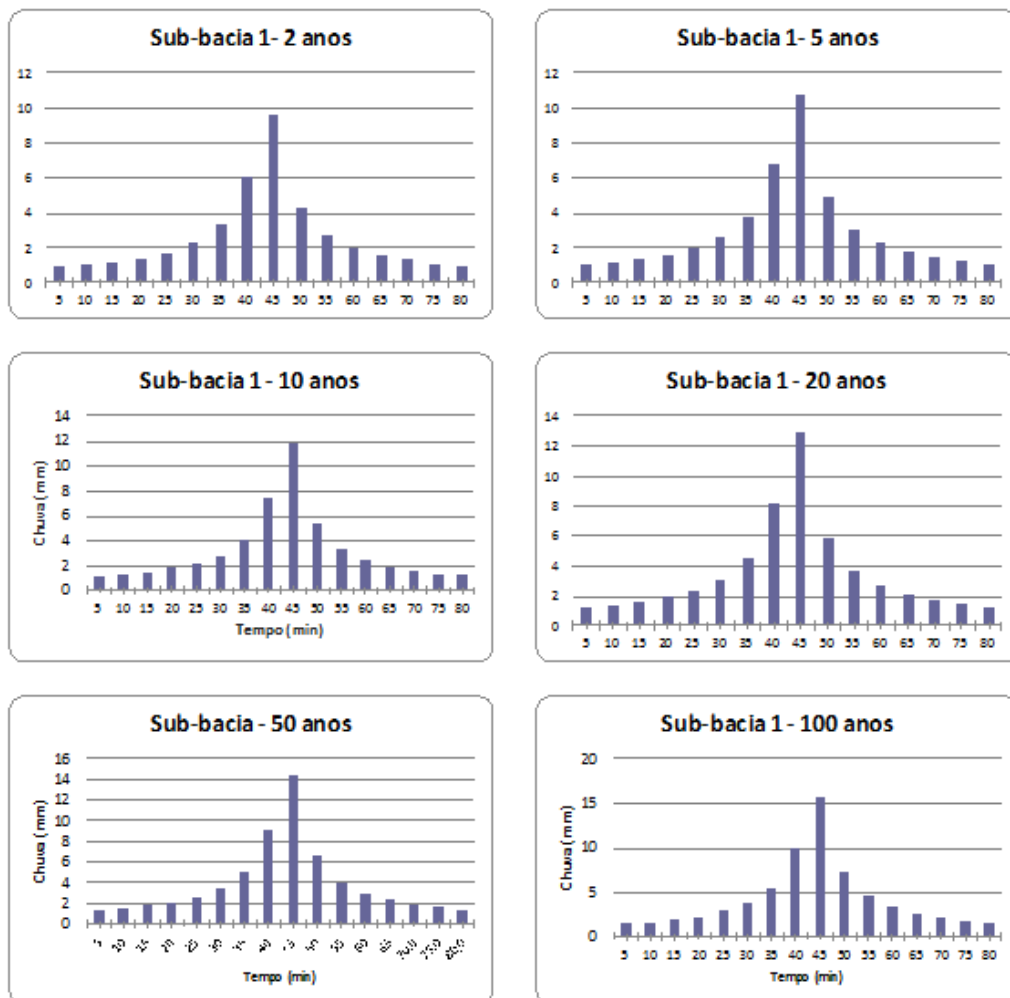
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos distribuídos**. 2010. Disponível em: <http://blog.rhama.net/2010/02/14/modelos-hidrologicos-distribuidos/>. Acesso em: 2016.
- UEHARA, K.; ZAHED FILHO, K.; SILVEIRA, L. N.; EIGER, S.; PALERMO, M. A. **Pequenas bacias hidrográficas dos estado de São Paulo – Estudo de vazões médias e máximas**. FDTE/ Escola politécnica da USP, São Paulo, v. 2. 1980
- USEPA. **Storm Water Management Model – User’s manual**. EPA. National Risk Management Research laboratory. Cincinnati, USA. 2012, 280 p.
- UNITED STATES ATMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-HMS: User’s Manual, version 3.5**. Hydrologic Engineering Center, 2010, 318 p.
- VINAGRE, M. V. A.; LIMA, A. C. M.; LIMA JUNIOR, D. L. Estudo do comportamento hidráulico da bacia do Paracuri em Belém (PA) utilizando o programa Storm Water Management Model. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**. Rio de Janeiro, v. 20, n. 3, p. 361-368, 2015.
- WALSH, T. C.; POMEROY, C. A.; BURIAN, S. J. Hydrologic modeling analysis of a passive, residential rainwater harvesting program in an urbanized, semi-arid watershed. **Journal of Hydrology**, Estados Unidos, v. 508, s/n, p. 240-253, 2014.
- WANG, S.; HUANG, G. H.; HUANG, W.; FAN, Y. R.; LI, Z. A fractional probabilistic collocation method for uncertainty propagation of hydrologic model parameters in a reduced dimensional space. **Journal of Hydrology**, v. 529, s. n., p. 1129-1146, 2015.
- WOLFF, D. A. Resíduos sólidos em um sistema de drenagem urbana no município de Santa Maria (RS). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p. 151-158, 2016.
- YAN, B.; FANG, N. F., ZHANG, P. C.; SHI, Z. H. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: An assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression. **Journal of Hydrology**, China, v. 484, s.n., p. 26-37, 2013.
- YI, X. A. A dam break analysis using HEC-RAS. **Journal of Water Resource and Protections**, v.3, n. 66, p. 370-379, 2011

APENDICE 1

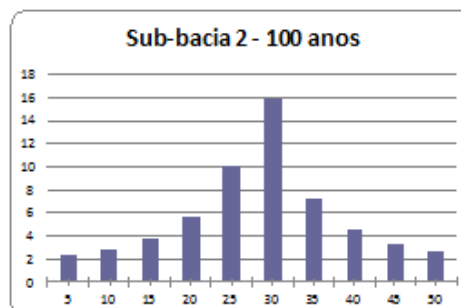
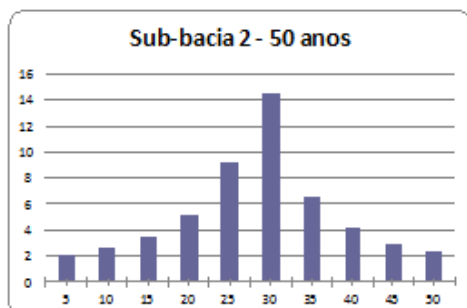
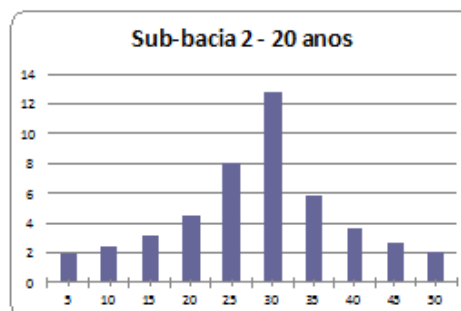
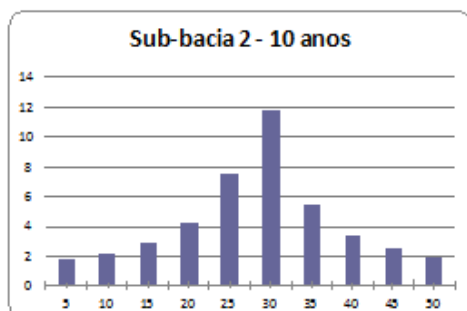
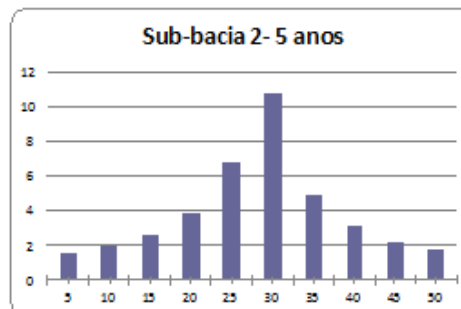
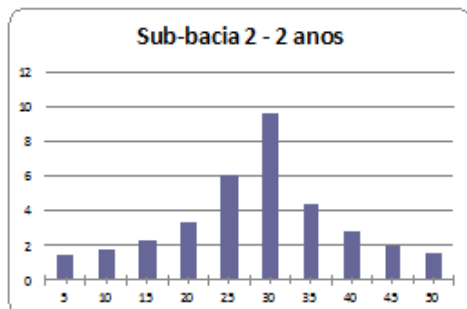
Os hietogramas de projeto da bacia Concentrada e das Sub-bacias 1 e 2, construídos por meio do método dos blocos alternados, estão apresentados nas figuras a seguir.



Hietogramas de projeto construídos para a bacia Concentrada



Hietogramas de projeto construídos para a Sub-bacia 1



Hietogramas de projeto construídos para a Sub-bacia 2