MILENA GARDAI COLLODEL

Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão

SÃO CARLOS - SP

2009

MILENA GARDAI COLLODEL

Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

Área de Concentração: Hidráulica e Saneamento

Orientadora: Prof^a Tit. Luisa Fernanda Ribeiro Reis

SÃO CARLOS - SP

2009

Aos meus pais, Hugo e Valéria, a quem devo a vida e minha formação moral. Meu reconhecimento e gratidão pela paciência, compreensão e apoio constante em todas as etapas da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À Professora Luisa Fernanda Ribeiro Reis, pela orientação, ensinamentos, apoio, paciência e amizade.

Aos meus irmãos, Thiago e Lucas, pelo amor e amizade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado.

Aos Professores Ademir Barbassa e Eduardo Mario Menciondo, pelas sugestões e contribuição feita na primeira qualificação e durante a realização desse trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Simulação Numérica (Labsin), Alice Araújo, Fausto Moraes, Frederico Odan, Katia Ventura e Thiago Galvão pela companhia, bom humor e colaboração no trabalho de campo.

Aos amigos de São Carlos, especialmente Alice, Micheli, Nayara, Paulo e Valter pela amizade e colaboração no trabalho de campo.

Às amigas de Curitiba, por compreenderem a ausência, a falta de tempo e, sobretudo, pelo apoio: Ana, Letícia, Luciana e Verônica.

Ao Luiz Henrique Maldonado por todo carinho, paciência e atenção.

Às funcionárias do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP: Sá, Pavi, Rose, Jaque, Flávia e Fernanda, pela colaboração.

Ao funcionário do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP: André, pela colaboração.

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento por toda a estrutura concedida e colaboração para realizar este trabalho.

Enfim, a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

“A natureza deve ser considerada como um todo, mas deve ser estudada em detalhe.”

(Mario Bunge)

RESUMO

Collodel, M.G. (2009). **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão.** Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Nos últimos anos os modelos hidrológicos distribuídos vêm ganhando espaço por permitirem que a variabilidade espacial das características das bacias hidrográficas seja incorporada no processo de transformação chuva-vazão. Porém, devido a essa capacidade, os modelos distribuídos tendem a ser matematicamente complexos, impondo que muitos parâmetros sejam medidos ou estimados. Apesar de a literatura apresentar diversos trabalhos que tentem verificar o nível de detalhamento mais adequado à representação dos diversos sistemas, as conclusões são contraditórias, mostrando que há necessidade de estudos mais aprofundados. O presente trabalho propõe e avalia diferentes níveis de detalhamento na representação da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, na cidade de São Carlos, SP, submetida aos processos hidrológicos intervenientes na transformação chuva-vazão, empregando o modelo hidrológico Storm Water Management Model – SWMM. A calibração dos eventos, necessária a adequação dos parâmetros do modelo, utilizou como ferramenta os algoritmos genéticos, produzindo resultados satisfatórios, com coeficientes de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970) entre 0,74 e 0,87, variáveis de evento para evento. De uma forma geral, os resultados obtidos com a análise dos diferentes níveis de detalhe evidenciaram a importância da consideração da micro-drenagem na representação dos sistemas. Para os eventos mais frequentes submetidos à análise quanto maior o detalhe imposto na representação da bacia, maior a velocidade de escoamento resultante da baixa rugosidade das galerias pluviais, e, portanto, maiores vazões de pico foram encontradas. Os resultados ressaltaram também a influência das áreas impermeáveis sobre os hidrogramas, ratificando a importância da determinação criteriosa desse parâmetro.

Palavras-chave: Drenagem urbana, modelos chuva-vazão, calibração, parâmetros, SWMM.

ABSTRACT

Collodel, M.G. (2009). **Application of the hydrologic model SWMM in the evaluation of different levels of catchment discretization for rainfall-runoff simulation.** Master of Sciences Degree Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos.

For the last years, the distributed hydrological models have been recognized by allowing the incorporation of the spatial variability of catchment characteristics for rainfall-runoff simulation. However, due to this ability, the distributed models tend to be mathematically complex and to require many parameters to be measured or estimated. Although the literature presents several works that attempt to ascertain the level of discretization more appropriate to represent the various systems, the results are contradictory, showing the need for further studies. This work proposes and evaluates different levels of representation of the watershed of the Gregory Creek in the city of São Carlos, SP, under rainfall-runoff simulation, by applying the hydrologic model Storm Water Management Model – SWMM. The calibration of the events, needed to adequacy the model parameters, used as tool the genetic algorithm, producing satisfactory results, with values of Nash and Sutcliffe (1970) efficiency coefficients ranging between 0,74 and 0,87, varying from event to event . In general, the results showed the importance of considering the micro-drainage in the systems representation. For more frequent events, by increasing the level of catchment representation, the velocity of flow became greater, resulted from the low roughness of the conduits, and, therefore, higher peak flows rates were found. The results also emphasized the influence of the impervious areas on the hydrographs, confirming the great importance of careful determination of this parameter.

Key-words: Urban drainage, rainfall-runoff, calibration, parameters, SWMM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 – Distribuição da População Brasileira entre 1940 e 2000	24
Figura 3-2 - Distribuição da População de São Carlos entre 1940 e 2000.....	43
Figura 4-1 – Localização do Município de São Carlos	53
Figura 4-2 - Bacia Hidrográfica do Córrego do Gregório.....	54
Figura 4-3 - Pedologia da Bacia Hidrográfica do Córrego do Gregório.....	55
Figura 4-4 - Uso e Ocupação do Solo	56
Figura 4-5 – Esquema gráfico das Configurações 1, 3, 5 e 7.....	59
Figura 4-6 – Representação das larguras das sub-bacias	61
Figura 4-7 – Localização das seções transversais medidas em campo	65
Figura 4-8 – Trechos dos canais por rugosidade	66
Figura 4-9 – Esquema gráfico do offset de saída	67
Figura 4-10 – Representação geométrica das sarjetas	68
Figura 4-11 – Posto pluvio-fluviométrico – Estação Fórum (Foto: 01/11/2007).....	69
Figura 4-12 - Posto hidrométrico monitorado pelo SAAE (Foto: 01/11/2007)	70
Figura 4-13 – Localização dos postos de monitoramento hidrológico	70
Figura 4-14 – Precipitação e hidrograma observados do evento 2, utilizado na fase de validação.....	73
Figura 4-15 – Precipitação e hidrograma observados do evento 7, utilizado na fase de validação.....	73
Figura 4-16 – Precipitação e hidrograma observados do evento 12, utilizado nas fases de análise de sensibilidade e calibração.....	74
Figura 4-17 – Precipitação e hidrograma observados do evento 24, utilizado na fase de calibração.....	74
Figura 4-18 – Precipitação e hidrograma observados do evento 27, utilizado na fase de análise de sensibilidade.....	75
Figura 4-19 – Precipitação e hidrograma observados do evento 49, utilizado na fase de validação.....	75
Figura 4-20 – Precipitação e hidrograma observados do evento 52, utilizado nas fases de análise de sensibilidade e calibração.....	76
Figura 4-21 – Precipitação e hidrograma observados do evento 53, utilizado na fase validação	76
Figura 4-22 – Relação $A(R_h)^{2/3} \times H$ para o nó JP1	78

Figura 4-23 – Fluxograma explicativo da aplicação do SWMM	80
Figura 4-24– Representação do reservatório não linear.....	81
Figura 4-25 – Interface do Algoritmo – Macro: População Inicial	87
Figura 4-26 – Interface do Algoritmo – Macro: Duplas para Torneio	88
Figura 4-27 – Interface do Algoritmo – Macro: Recombinação	89
Figura 4-28 – Interface do Algoritmo – Macro: Mutação.....	89
Figura 4-29– Fluxograma do Algoritmo de Otimização.....	90
Figura 5-1 – Influência da porcentagem de áreas impermeáveis sobre a vazão de pico – Evento 12.....	94
Figura 5-2 – Influência da porcentagem de áreas impermeáveis sobre a vazão de pico – Evento 27.....	94
Figura 5-3 – Influência da porcentagem de áreas impermeáveis sobre a vazão de pico – Evento 52.....	95
Figura 5-4 – Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 12, Configuração 1..	95
Figura 5-5 - Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 27, Configuração 1..	96
Figura 5-6 - Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 52, Configuração 1..	96
Figura 5-7 – Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 12, Configuração 4..	97
Figura 5-8 - Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 27, Configuração 4..	97
Figura 5-9 - Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 52, Configuração 4..	98
Figura 5-10– Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 12, Configuração 8	98
Figura 5-11 - Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 27, Configuração 8	99
Figura 5-12 - Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 52, Configuração 8	99
Figura 5-13 – Influência dos parâmetros sobre o tempo de pico – Evento 12, Configuração 1	100
Figura 5-14– Influência dos parâmetros sobre o volume escoado – Evento 12, Configuração 1.	101
Figura 5-15 – Evolução dos valores de aptidão ao longo das gerações do AG – Evento 12.	102
Figura 5-16 - Evolução dos valores de aptidão ao longo das gerações do AG – Evento 24..	102
Figura 5-17 - Evolução dos valores de aptidão ao longo das gerações do AG – Evento 52..	103
Figura 5-18 – Hidrogramas Calculados e Observados – Evento 12 (Configurações 1 a 6)...	109
Figura 5-19 – Hidrogramas Calculados e Observados – Evento 12 (Configurações 7 a 11)	110
Figura 5-20 – Hidrogramas Calculados e Observados – Evento 24 (Configurações 1 a 6)...	111
Figura 5-21 – Hidrogramas Calculados e Observados – Evento 24 (Configurações 7 a 11).	112
Figura 5-22 – Hidrogramas Calculados e Observados – Evento 52 (Configurações 1 a 6)...	113

Figura 5-23 – – Hidrogramas Calculados e Observados – Evento 52 (Configurações 7 a 11)	114
Figura 5-24 – Evolução do COE (parcela superior) e desvios de volume (parcela inferior).	115
Figura 5-25 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 2 (Configurações 1 a 6)	117
Figura 5-26 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 2 (Configurações 7 a 11) ...	118
Figura 5-27 – Variação de vazão de pico e % de área impermeável e volume armazenado - Evento 2.....	120
Figura 5-28 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 7 (Configurações 1 a 6)	121
Figura 5-29 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 7 (Configurações 7 a 11) ...	122
Figura 5-30 – Variação de vazão de pico, % de área impermeável e volume armazenado - Evento 7.....	123
Figura 5-31 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 49 (Configurações 1 a 6) ...	125
Figura 5-32 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 49 (Configurações 7 a 11)..	126
Figura 5-33 – Variação de vazão de pico, % de área impermeável e volume armazenado - Evento 49.....	127
Figura 5-34 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 53 (Configurações 1 a 6) ...	129
Figura 5-35 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 53 (Configurações 7 a 11)..	130
Figura 5-36 – Variação de vazão de pico, % de área impermeável e volume armazenado - Evento 53.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – População Brasileira (Rural e Urbana) entre 1940 e 2000	23
Tabela 3-2 - Modelos Hidrológicos Aplicados à Drenagem Urbana.....	28
Tabela 3-3 – Resumo das características dos modelos hidrológicos	30
Tabela 3-4 – Resumo dos trabalhos sobre níveis de detalhamento	42
Tabela 3-5 - População de São Carlos (Rural e Urbana) entre 1940 e 2000.....	43
Tabela 4-1 – Diâmetros e comprimentos levantados em campo	57
Tabela 4-2 – Configurações da rede de drenagem.....	58
Tabela 4-3 – Parâmetros das Sub-bacias.....	60
Tabela 4-4- Intervalo de parâmetros do SWMM para rugosidade e armazenamento	62
Tabela 4-5 – Valores de AIDC e AINC para São Carlos.....	63
Tabela 4-6 – Intervalos de parâmetros do SWMM para infiltração	63
Tabela 4-7 – Parâmetros dos Condutos.....	64
Tabela 4-8 - Localização das seções transversais medidas em campo	65
Tabela 4-9 - Coeficientes de rugosidade de Manning para os canais naturais.....	65
Tabela 4-10 – Características dos canais naturais por trecho.....	66
Tabela 4-11 – Parâmetros dos nós	68
Tabela 4-12 – Caracterização dos eventos	71
Tabela 4-13 – Parâmetros avaliados na análise de sensibilidade	84
Tabela 4-14 – Intervalos dos parâmetros não variáveis espacialmente	86
Tabela 4-15– Parâmetros da População Inicial	87
Tabela 4-16 - Intervalos dos parâmetros calibrados variáveis espacialmente.....	91
Tabela 5-1 – Resultados obtidos na calibração manual	104
Tabela 5-2 – Resultados obtidos com a calibração automática	104
Tabela 5-3 – Valores iniciais e calibrados da porcentagem de áreas impermeáveis	107
Tabela 5-4 – Valores obtidos com a simulação do Evento 2	119
Tabela 5-5 – Valores obtidos com a simulação do Evento 7	123
Tabela 5-6 – Valores obtidos com a simulação do Evento 49	127
Tabela 5-7 – Valores obtidos com a simulação do Evento 53	131
Tabela 5-8 – Galerias Pluviais Afogadas	133

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Área da bacia hidrográfica ou sub-bacia
- $A_{\text{mínima}}$ – Área mínima de contribuição dos condutos
- A_{dren} – Área de drenagem a montante
- AI – Porcentagem de áreas impermeáveis da bacia hidrográfica ou sub-bacia
- $AI_{\text{médio}}$ – Porcentagem de áreas impermeáveis por sub-bacia
- AIDC – Porcentagem de áreas impermeáveis diretamente conectadas
- AINC – Porcentagem de áreas impermeáveis não conectadas
- $A_{\text{mínima}}$ – Área mínima de contribuição
- AP – Porcentagem de áreas permeáveis
- A_{ST} – Área da seção transversal
- A_t – Área de contribuição referente ao ponto médio do trecho ou ao nó
- COE – Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe
- d – Duração da chuva
- D – Altura de água
- DD – Densidade de drenagem
- DI – Capacidade de armazenamento das superfícies impermeáveis
- DP – Capacidade de armazenamento das superfícies permeáveis
- EQp – Desvio sobre a vazão de pico
- EVe – Desvio sobre o volume total escoado
- F – Função objetivo
- $F_{\text{máx}}$ – Valor máximo de F
- $F_{\text{médio}}$ – Valor médio de F
- h – nível de água
- H – Cota piezométrica
- h_{inicial} – Altura inicial de escoamento
- h_{off} – Offset de saída
- $h_{\text{máx}}$ – Altura máxima do nó
- i – Inclinação da sarjeta
- i^* – Chuva efetiva
- $I_{\text{média}}$ – Intensidade média da chuva
- I0 – Capacidade inicial de infiltração

I_b – Capacidade final de infiltração
 IPA – Índice de precipitação acumulada
 j – Quantidade de condutos existentes na rede de drenagem
 k – Constante de decaimento da infiltração
 k_c – Coeficiente de compacidade adimensional
 L – Comprimento dos condutos
 L_e – Largura do retângulo equivalente
 N_{cn} – Coeficiente de rugosidade de Manning para canais naturais
 $N_{g,s}$ – Coeficiente de rugosidade de Manning para galerias e sarjetas
 NI – Coeficiente de rugosidade de Manning para superfícies impermeáveis
 NP – Coeficiente de rugosidade de Manning para superfícies permeáveis
 N_t – Número de intervalos de tempo do evento analisado
 P – Perímetro da bacia hidrográfica ou sub-bacia
 P_1, P_2 – Soluções “pais”
 P_{total} – Precipitação total
 q – Vazão específica da bacia hidrográfica ou sub-bacia
 Q_b – Vazão de base
 Q_c – Vazão calculada
 Q_{obs} – Vazão observada
 $\overline{Q_o}$ – Vazão observada média
 Q_{pc} – Vazão de pico calculada
 Q_{po} – Vazão de pico observada
 Q – Vazão
 R^2 – Coeficiente de correlação
 R_h – Raio hidráulico
 S – Declividade média da bacia hidrográfica ou sub-bacia
 S_1, S_2 – Soluções “filhas”
 S_c – Declividade média dos condutos
 S_f – Declividade da linha de energia
 TR – Período de retorno
 V – Volume de água sobre a sub-área
 Vec – Volume total escoado calculado
 Ve_o – Volume total escoado observado

W – Largura da bacia hidrográfica ou sub-bacia

y – Altura da sarjeta

Z – Cota do fundo do nó

β – Número aleatório entre 0 e 1

ϕ – Diâmetro das galerias pluviais

LISTA DE SIGLAS

CDCC – Centro de Divulgação Científica e Cultural
CG – Galeria pluvial do Córrego do Gregório
CGJ – Sarjeta do Córrego do Gregório
CHM – Chicago Hydrograph Method
CI – Galeria pluvial do Córrego do Invernada
CL – Galeria pluvial do Córrego do Lazarini
CLJ – Sarjeta do Córrego do Lazarini
CP – Canal principal
CRHEA – Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada
CS – Canal secundário
CT – Canal terciário
DHI – Danish Hydraulic Institute
DR3M – Distributed Routing Rainfall-Runoff Model
EESC – Escola de Engenharia de São Carlos
EPA – Environmental Protection Agency
ILLUDAS – Illinois Urban Drainage Area Simulator
IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas
JGG – Nó da galeria pluvial do Córrego do Gregório
JGI – Nó da galeria pluvial do Córrego do Invernada
JGL – Nó da galeria pluvial do Córrego do Lazarini
JP – Nó do canal principal
JS – Nó do canal secundário
JT – Nó do canal terciário
MHD – Modelo Hidrológico Determinístico
MMSC – Mercado Municipal de São Carlos
MOUSE – Modelling of Urban Sewer
Out – Exutório
PC – Seção de monitoramento hidrológico
PG – Ponto de medição da seção transversal do Córrego do Gregório
PI – Ponto de medição da seção transversal do Córrego do Invernada
PL – Ponto de medição da seção transversal do Córrego do Lazarini

SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos

SCS – Soil Conservation Service

SG – Sub-bacia do Córrego do Gregório

SI – Sub-bacia do Córrego do Invernada

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SL – Sub-bacia do Córrego do Lazarini

SMH DU – Secretaria Municipal de Habitação e Desenvolvimento Urbano de São Carlos

SRTC – Sensitivity-based Radio Tuning Calibration

STORM – Storage, Treatment, Overflow Runoff Model

SWMM – Storm Water Management Model

TR-55 – SCS Technical Release 55

UFRS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USGS – United States Geological Survey

USP – Universidade de São Paulo

UTM – Universal Transverse Mercator

SUMÁRIO

1	Introdução	19
2	Objetivos.....	21
2.1	Objetivo Principal	21
2.2	Objetivos Específicos	21
3	Revisão Bibliográfica.....	23
3.1	Urbanização	23
3.2	Modelos Hidrológicos	25
3.2.1	Classificação dos Modelos Hidrológicos.....	26
3.2.2	Aplicação de Modelos Hidrológicos	27
3.2.3	SWMM	30
3.3	Calibração dos Modelos Hidrológicos	36
3.4	Nível de Detalhamento Espacial	37
3.5	Estudo de Caso – São Carlos	42
4	Material e Métodos.....	53
4.1	Área de Estudo	53
4.1.1	Pedologia	54
4.1.2	Uso e Ocupação do Solo.....	55
4.2	Levantamento de Campo	56
4.3	Discretização da Bacia.....	57
4.4	Representação das Características da Bacia	59
4.4.1	Sub-Bacias	60
4.4.2	Condutores	64
4.4.3	Nós.....	68
4.5	Dados Hidrológicos.....	69
4.5.1	Eventos de Precipitação.....	71
4.5.2	Hidrogramas Observados.....	72
4.5.3	Escoamento de Base.....	77
4.6	Aplicação do SWMM.....	79
4.6.1	Análise de Sensibilidade.....	83
4.6.2	Calibração do SWMM.....	85
4.6.3	Validação	91
5	Resultados e Discussão	93
5.1	Análise de Sensibilidade.....	93
5.2	Calibração do SWMM.....	101
5.2.1	Parâmetros Não Variáveis Espacialmente	101
5.2.2	Parâmetros Variáveis Espacialmente	104
5.3	Validação	116
5.3.1	Evento 2.....	116
5.3.2	Evento 7.....	120
5.3.3	Evento 49.....	124
5.3.4	Evento 53.....	128
5.4	Galerias Afogadas	132
5.5	Representação dos Elementos do Sistema de Drenagem	135
6	Conclusões e Recomendações.....	137
	Referências Bibliográficas	141

APÊNDICE A – Registro de Precipitação.....	147
APÊNDICE B – Mapeamento da Rede de Drenagem	153
APÊNDICE C – Detalhamento das Seções Transversais	171
APÊNDICE D – Características da Bacia Hidrográfica do Córrego do Gregório – Arquivos de Entrada do SWMM.....	177
ANEXO A – Procedimentos de Cálculo adotados pelo SWMM (traduzido de JAMES ET AL., 2008)	207

1 Introdução

Nas últimas décadas, o Brasil e os demais países em desenvolvimento têm apresentado grandes taxas de crescimento urbano, responsáveis por profundas modificações sobre o meio ambiente. A introdução do conceito de economia sustentável nas políticas nacional e internacional aumentou a preocupação da sociedade em conciliar o desenvolvimento urbano com a preservação ambiental.

Um dos problemas gerados pelo crescimento das áreas urbanas é a impermeabilização e o conseqüente aumento do escoamento superficial. A diminuição da infiltração da água no solo promove, portanto, mudanças nas fases do ciclo hidrológico, aumentando a magnitude das vazões (escoamento superficial) e diminuindo o tempo de ocorrência de picos de vazão.

A identificação de tais problemas aponta para a necessidade de planejamento no sentido de controlar os impactos causados pela impermeabilização das bacias hidrográficas, buscando maneiras de restabelecer as condições ambientais anteriores à urbanização.

Para prognosticar os efeitos da impermeabilização e as formas de restabelecer condições ambientais mais favoráveis, os hidrólogos vêm utilizando técnicas como o monitoramento hidrológico, acompanhado dos modelos de simulação.

Nos últimos anos os modelos hidrológicos distribuídos ganharam espaço por permitir a incorporação da variabilidade espacial das características das bacias hidrográficas e da precipitação. Porém, devido a essa capacidade, os modelos distribuídos tendem a ser matematicamente complexos e requerem inúmeros parâmetros, que devem ser medidos ou estimados, aumentando os esforços computacionais e de modelagem de uma forma geral. Portanto é ideal que haja um equilíbrio entre o nível de detalhamento das bacias hidrográficas e os esforços de modelagem, de forma que resultados satisfatórios possam ser obtidos.

O presente trabalho avalia diferentes níveis de detalhamento na representação dos sistemas sujeitos aos processos hidrológicos intervenientes na reprodução do processo de transformação chuva-vazão aplicado à bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, na cidade de São Carlos, SP, com o suporte do *Storm Water Management Model – SWMM Version 5* (U.S. Environmental Protection Agency).

A apresentação desse trabalho contém as seguintes seções:

- Objetivos: enumera os objetivos a serem alcançados pela pesquisa em questão;

- Revisão bibliográfica: reúne alguns dos trabalhos mais importantes realizados em drenagem urbana, com o uso do modelo SWMM e para o município de São Carlos. SP;
- Material e métodos: discorre sobre as metodologias empregadas em cada etapa do estudo;
- Resultados e discussão: apresenta e discute os resultados obtidos;
- Conclusões e recomendações: ressalta as conclusões e enumera as possibilidades futuras de trabalho;
- Referências bibliográficas: indica as obras utilizadas como fonte de pesquisa;
- Apêndices e anexos: apresentam figuras e procedimentos de cálculo.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Principal

Avaliar diferentes níveis de detalhamento na representação da bacia submetida aos processos hidrológicos intervenientes no processo de transformação chuva-vazão, analisando o comportamento do *Storm Water Management Model – SWMM* aplicado à bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, na cidade de São Carlos, SP.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar as características físicas da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, a partir do levantamento de dados existentes;
- Mapear as galerias pluviais existentes na malha urbana da bacia;
- Realizar análise de sensibilidade dos parâmetros do SWMM;
- Elaborar rotina de calibração;
- Calibrar os parâmetros do SWMM para a bacia do Córrego do Gregório – São Carlos, SP;
- Propor e avaliar diferentes níveis de detalhamento na representação do sistema de drenagem da bacia em estudo;
- Localizar galerias pluviais afogadas e quantificar os volumes excedidos.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Urbanização

A urbanização é o fenômeno da transferência de pessoas do meio rural para o meio urbano, que se caracteriza pelo aumento da população urbana em detrimento da população rural.

O processo de industrialização do século XVIII impulsionou o êxodo rural, dando início ao processo de urbanização nos países desenvolvidos. Nos países em desenvolvimento, dentre os quais se inclui o Brasil, a industrialização foi tardia, assim como o fenômeno da urbanização, que teve início em meados do século XX. Na década de 70, a modernização acelerou o processo de expansão urbana, que vem ocorrendo até hoje de forma insustentável e trazendo consequências para o espaço urbano desses países. A distribuição da população brasileira em áreas rurais e urbanas, entre os anos de 1940 a 2000, pode ser visualizada na Tabela 3-1 e na Figura 3-1.

Tabela 3-1 – População Brasileira (Rural e Urbana) entre 1940 e 2000					
Ano	População				
	Total (milhões de habitantes)	Urbana	Rural	Urbana (%)	Rural (%)
1940	41,24	12,88	28,36	31,24	68,76
1950	51,94	18,78	33,16	36,16	63,84
1960	70,07	31,30	38,77	44,67	55,33
1970	93,14	52,08	41,05	55,92	44,08
1980	119,00	80,44	38,57	67,59	32,41
1991	146,83	110,99	35,83	75,59	24,41
1996	157,07	123,08	33,99	78,36	21,64
2000	169,80	137,95	31,85	81,25	18,75
2008*	189,61	-	-	-	-

* Valor estimado para 01/07/2008, segundo IBGE.

Fonte: IBGE – Censos Demográficos de 1940 a 2000.

Figura 3-1 – Distribuição da População Brasileira entre 1940 e 2000

Fonte: IBGE – Censos Demográficos de 1940 a 2000.

Essa tendência, de crescimento urbano, acentuada nos últimos anos, tem causado deterioração da qualidade de vida e do meio ambiente. Segundo Tucci (2005), as principais consequências advindas da urbanização são: grande concentração populacional em pequenas áreas, aumento da periferia das cidades de forma descontrolada e a falta de planejamento urbano para as áreas da cidade ocupadas pela população de baixa renda, ocorrendo ocupação de áreas de risco.

Dentre os efeitos decorrentes da urbanização está a impermeabilização de regiões antes permeáveis. Araújo et al. (1999) alertam que a impermeabilização do solo por meio de telhados, ruas, calçadas, pátios e estacionamentos, alteram as características de volume e qualidade da água nas diversas fases do ciclo hidrológico, aumentando a ocorrência de enchentes urbanas. O volume de água que antes infiltrava, ficava retido pelas plantas ou escoava lentamente pela superfície do solo, passa a escoar através de superfícies impermeáveis, condutos e canais, exigindo maior capacidade de escoamento das seções (GARCIA, 2005).

As mudanças nas características do ciclo hidrológico ocasionadas pela diminuição da infiltração da água no solo são as seguintes: aumento do escoamento superficial, de sua

velocidade e das vazões máximas, redução dos tempos de concentração (tempo de deslocamento do escoamento pela bacia hidrográfica) e de pico, e diminuição do nível do lençol freático, devido à falta de alimentação do aquífero.

As transformações do ciclo hidrológico em conjunto com o aumento das superfícies impermeáveis levam a maiores probabilidades de ocorrência de inundações. O crescimento das áreas urbanas também pode produzir obstruções ao escoamento, aumentando a magnitude das possíveis enchentes.

Os principais impactos das inundações sobre a população são: perdas materiais e humanas, interrupção da atividade econômica das áreas inundadas, contaminação da água e contaminação da população por doenças de veiculação hídrica (TUCCI, 2005).

3.2 Modelos Hidrológicos

Os modelos de simulação, acompanhados do monitoramento hidrológico, apresentam-se como ferramentas eficientes para prognosticar os efeitos causados às bacias hidrográficas pelo crescimento urbano, possibilitando planejamento adequado do desenvolvimento das cidades.

As bacias hidrográficas sofrem diversas variações em suas propriedades, portanto o seu monitoramento pode fornecer indicações a respeito de mudanças desejáveis ou indesejáveis que estejam ocorrendo com os recursos hídricos como consequência de práticas de manejo (RENNÓ & SOARES, 2000).

Para Paiva (2001), o monitoramento hidrológico é um dos aspectos importantes na adequada caracterização quali-quantitativa dos recursos hídricos. Para a utilização e aplicação de modelos é fundamental a existência de séries de dados hidráulicos e hidrológicos confiáveis.

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que a envolvem (RENNÓ & SOARES, 2000). Eles estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a compreender os impactos gerados por mudanças no uso do solo e prever alterações futuras nos ecossistemas. O modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou sub-superfície terrestre.

Os primeiros modelos hidrológicos computacionais começaram a ser criados na década de 60, com o início da utilização dos computadores. Desde então, inúmeros modelos foram propostos para a simulação da ocorrência da água nas diversas fases do ciclo hidrológico.

3.2.1 Classificação dos Modelos Hidrológicos

Por terem sido desenvolvidos para atender a necessidades diversas, os modelos hidrológicos possuem classificações diferentes.

Segundo Tucci (1998), podemos classificar os modelos utilizados no gerenciamento dos recursos hídricos em modelos de comportamento, de otimização e de planejamento. Os modelos de comportamento descrevem o comportamento de um sistema, prognosticando a resposta deste quando estiver sujeito a diferentes entradas ou a modificações em suas características. Os modelos de otimização, por sua vez, são utilizados para obtenção das melhores soluções para problemas específicos da Engenharia de Recursos Hídricos. Por fim, os modelos de planejamento buscam soluções hidráulicas, hidrológicas e econômicas, englobando também considerações sócio-econômicas e ambientais.

O tipo de variável utilizada na modelagem determina se o modelo é estocástico ou determinístico. Assim, se o modelo desconsiderar o conceito de probabilidade, é definido determinístico, mas se uma das variáveis utilizadas pelo modelo tiver comportamento aleatório, ele é definido estocástico.

As relações existentes entre as variáveis envolvidas classificam os modelos hidrológicos em conceituais ou empíricos. Os modelos conceituais são baseados em processos físicos, numa tentativa de simular todos os processos que envolvem os fenômenos hidráulico-hidrológicos. Já os modelos empíricos utilizam valores observados em suas simulações, através de relações empíricas estimadas e, por possuírem características específicas de determinadas regiões, são pouco empregados.

Os modelos também podem ser contínuos ou discretos. Segundo Tucci (1998) um modelo é considerado contínuo se os fenômenos forem representados continuamente no tempo; e discreto quando as mudanças de estado ocorrerem em intervalos de tempo discretos.

Normalmente, os fenômenos naturais variam continuamente no tempo, embora muitas vezes possam ser representados por modelos discretos.

Por fim, quanto à variabilidade espacial admitida para os parâmetros, os modelos são classificados em concentrados, semi-distribuídos e distribuídos. Os modelos concentrados (ou pontuais) consideram a bacia como um todo homogêneo, em que todas as variáveis de entrada e saída são representativas de toda área estudada. Os modelos semi-distribuídos e distribuídos, por sua vez, consideram a variabilidade espacial encontrada nos diversos parâmetros do modelo, tornando-se mais complexos e realísticos.

3.2.2 Aplicação de Modelos Hidrológicos

Existe atualmente um grande número de modelos hidrológicos à disposição dos profissionais da área de recursos hídricos. De acordo com Machado (1981), isso se deve às finalidades específicas de cada modelo e às diferentes formulações matemáticas empregadas para simular os processos. Uma das etapas de maior importância para os modeladores está na escolha do modelo a ser utilizado. Para Maksimovic (2001) a escolha depende dos objetivos da modelagem, da cobertura espacial pretendida e/ou existente, da variabilidade dos dados, da tecnologia empregada e do conhecimento do modelador. A esses fatores deve-se adicionar a disponibilidade dos dados, já que os modelos mais complexos requerem informações mais precisas referentes às bacias hidrográficas.

Os trabalhos de Brandstetter (1976) e Elliot e Trowsdale (2007) são exemplos de revisões críticas em que análises comparativas entre diversos modelos existentes na literatura são realizadas. A seguir serão apresentados e comparados alguns dos modelos hidrológicos mais aplicados à drenagem urbana na atualidade, segundo a literatura internacional especializada. A Tabela 3-2 apresenta esses modelos e suas respectivas origens.

Tabela 3-2 - Modelos Hidrológicos Aplicados à Drenagem Urbana

<i>Código</i>	<i>Nome</i>	<i>Agência Criadora</i>	<i>Ano</i>
MOUSE	Modelling of Urban Sewer	DHI	1985
CHM	Chicago Hydrograph Method	City of Chicago	1959
ILLUDAS	Illinois Urban Drainage Area Simulator	Ill. Water Survey	1972
STORM	Storage, Treatment, Overflow Runoff Model	Corps of Engineers	1974
TR-55	SCS Technical Release 55	SCS	1975
DR3M	Distributed Routing Rainfall-Runoff Model	USGS	1978
IPH-2	Instituto de Pesquisas Hidráulicas	IPH-UFRS	1981
SWMM	Storm Water Management Model	EPA	1971

Fonte: VIESSMAN & LEWIS (2002), modificado.

Meller (2004) e Garcia (2005) alegam que dentre os modelos hidrológicos utilizados para fins de drenagem urbana, um dos aplicativos que mais se destacam é o MOUSE - Modelling of Urban Sewer (DHI, 1985). Desenvolvido pelo Instituto de Hidráulica da Dinamarca - DHI para simular variações espaciais de escoamento, profundidade da água, transporte de sedimentos e poluentes em rios e canais abertos, pode também ser utilizado para prever deficiências hidráulicas, locais de sobrecarga de vazão e inundações.

Meller (2004) empregou o aplicativo MOUSE para avaliar problemas decorrentes da ineficiência da drenagem, apontando soluções para o planejamento da drenagem urbana na bacia hidrográfica Alto da Colina, no município de Santa Maria, RS.

O Método do Hidrograma de Chicago - CHM, desenvolvido por Tholin e Keifer (1959), é um dos modelos urbanos de escoamento mais antigos. Desde seu desenvolvimento tem sido bastante utilizado para projetos hidrológicos de sistemas de esgoto combinado na cidade de Chicago, entretanto para outras regiões a literatura não apresenta registros de aplicações significativos (AGYEI ET AL., 1981).

O Simulador de Drenagem Urbana de Illinois – ILLUDAS (TERSTRIEP & STALL, 1974) é uma versão aprimorada do Método do Laboratório de Pesquisas de Estradas, de 1962. Permite que o usuário opere de duas maneiras: projeto e análise. Para o módulo projeto são produzidos hidrogramas e fornecidos os diâmetros adequados para as galerias de águas pluviais de forma a não haver sobrecarga. O módulo análise, por sua vez, gera os hidrogramas dos condutos e dos nós, localizando os locais em que a rede encontra-se sobrecarregada.

Criado pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano em 1974, o STORM – Storage, Treatment, Overflow Runoff Model é um modelo contínuo de simulação da quantidade e da qualidade da água em sistemas urbanos, podendo ser aplicado a eventos isolados ou a séries contínuas.

O TR-55 foi originalmente desenvolvido pelo Soil Conservation Service (SCS, 1975) e tem sido amplamente utilizado na área de hidrologia nos Estados Unidos da América. Apresenta procedimentos simples para cálculo de volumes, picos, tempos de pico, hidrogramas e volumes armazenados, decorrentes de eventos chuvosos, em pequenas bacias urbanas.

O DR3M – Distributed Routing Rainfall-Runoff Model (DAWDY ET AL., 1978) foi criado para atender pequenas bacias. Era concentrado e aplicável somente a eventos isolados. Mais tarde foi aperfeiçoado, tornando-se distribuído e aplicável a eventos quase-contínuos e bacias urbanas. Segundo Viessman e Lewis (2002) existem muitas aplicações do DR3M documentadas nos Estados Unidos continental, Alaska e Havaí.

Na América do Sul e no Brasil, o modelo hidrológico de simulação mais difundido é o IPH II (TUCCI ET AL., 1981; TUCCI & CAMPANA, 1993). Desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, é composto pelos seguintes algoritmos: perdas por evaporação e interceptação, separação de escoamentos, e propagação dos escoamentos superficiais e subterrâneos (TUCCI, 1998). Para a simulação de trechos em canais existem as versões IPH III e IV, que utilizam modelos de onda cinemática e hidrodinâmico, respectivamente.

Mais tarde, Tucci et al. (1989), apresentaram um sistema computacional modulado, denominado IPH-S1, que permite ao usuário optar por modelos já consagrados pela literatura em cada fase do processo de transformação da precipitação em vazão, tais como: HEC-1, SSARR, IPH-II, STANFORD IV, HYMO, dentre outros.

A Tabela 3-3 apresenta um resumo das características de alguns modelos hidrológicos citados anteriormente, que comprova a maior abrangência e flexibilidade de simulação do SWMM, descrito no próximo item dessa dissertação.

Tabela 3-3 – Resumo das características dos modelos hidrológicos

Capacidades de Simulação	Modelos				
	CHM	ILLUDAS	STORM	IPHS1	SWMM
Múltiplas sub-bacias	x	x	-	x	x
Entrada de diversos hietogramas	x	-	-	x	x
Evaporação	x	-	x	-	x
Degelo	-	x	x	-	x
Escoamento de base	x	x	-	x	x
Escoamento de superfície de	x	x	x	x	x
áreas impermeáveis	x	x	x	x	x
Escoamento de superfície de	x	x	x	x	x
áreas permeáveis	x	x	x	x	x
Áreas diretamente conectadas	-	x	-	-	x
Balanco hídrico entre eventos	x	-	x	x	x
Escoamento em sarjetas	x	x	x	-	x
Propagação em galerias	x	x	x	x	x
Múltiplas seções transversais	-	-	-	-	x
Escoamento sob pressão	-	-	-	-	x
Derivação	-	x	x	x	x
Estações-elevatórias	-	x	-	-	x
Armazenamento	-	x	x	x	x
Cálculo de nível	-	x	-	x	x
Cálculo de velocidades	-	x	-	x	x
Simulação contínua	-	-	x	x	x
Escolha do passo de tempo	x	x	-	x	x
Cálculo de projetos	x	x	-	x	x
Código computacional disponível	x	x	x	x	x
	x	Permite a simulação			
	-	Não permite a simulação			

FONTE: MACHADO (1981) e VIESSMAN & LEWIS (2002), modificado.

3.2.3 SWMM

Desenvolvido em 1971 pela U.S. EPA - Environmental Protection Agency, o *Storm Water Management Model* – SWMM (HUBER & DICKINSON, 1992), vem sendo submetido a diversas melhorias e merece destaque por tratar-se de um pacote de domínio público, amplamente utilizado por pesquisadores do mundo todo, permite a incorporação do nível de detalhe desejado (micro e macro-drenagem), razões pelas quais foi escolhido como ferramenta de estudo nesse trabalho.

Trata-se de um modelo hidrológico dinâmico, que, a partir de dados de entrada, simula hidrogramas resultantes. Determina a quantidade do escoamento gerado em cada sub-bacia, além da vazão e da profundidade de fluxo, a qualidade da água em cada tubulação ou canal, durante o período da simulação, que compreende vários módulos de avaliação. Assim, o SWMM possui diferentes aplicações: sistemas de drenagem para controle de inundações, percepção dos problemas de controle de inundação e qualidade de água, fontes de geração dos poluentes para estudos de redução, entre outras.

A simulação do escoamento superficial é realizada considerando que as sub-bacias se comportem como reservatórios não lineares, representados pela combinação das equações de Manning e da continuidade. A equação diferencial não linear é, então, solucionada pelo processo iterativo de Newton-Raphson. A propagação do escoamento pela rede de drenagem, por sua vez, é calculada pelas equações completas de Saint Venant, através de um esquema explícito, segundo o método de Euler modificado (GARCIA & PAIVA, 2006).

A literatura apresenta diversos estudos realizados aplicando o *Storm Water Management Model* (SWMM). Alguns desses estudos são comentados a seguir.

Warwick e Tadepalli (1991) investigaram a capacidade do SWMM em prever hidrogramas para uma bacia com área de drenagem de 25,9 km², com aproximadamente 30% de áreas impermeáveis, em Dallas, Texas. O principal objetivo desse trabalho era analisar a habilidade do modelo em realizar a simulação hidrológica com o ajuste de apenas dois parâmetros, separadamente: armazenamento em depressões permeáveis e a porcentagem de superfícies impermeáveis.

Para tanto foram propostos três diferentes níveis de discretização da bacia, denominados cenários, todos muito simplificados, devido à falta de dados disponíveis, considerando somente a macro-drenagem. O cenário 1 continha uma bacia, de formato retangular, nenhum canal de propagação, sendo avaliado somente o escoamento superficial, e uma estação pluviométrica. Já para representação do cenário 2 foi adicionado um canal à bacia. O cenário três, por sua vez, era concebido por duas sub-bacias, dois canais e duas estações pluviométricas.

A calibração dos parâmetros, realizada manualmente, foi efetuada para três eventos distintos, com picos de vazão significativamente diferentes, porém mesma condição de umidade antecedente, através da minimização de um desvio estatístico que incorporasse o valor quadrático médio (RMS), em função da vazão de pico e do volume escoado. Os resultados médios obtidos foram de 0,37 para vazão de pico e 0,60 para volume escoado, sendo o mínimo buscado zero. Após o ajuste dos parâmetros, os autores avaliaram o

desempenho do modelo calibrado, para nove eventos, através da maximização do coeficiente de eficiência desenvolvido por Loague e Freeze (1985), buscando o valor 1,0. Os resultados alcançados durante a verificação foram superiores a: 0,50 para volume e 0,40 para vazão de pico.

O uso da porcentagem de superfícies impermeáveis como parâmetro de calibração para ajuste dos hidrogramas resultou em melhores desempenhos do que o uso do armazenamento em depressões permeáveis, segundo os autores. O impacto causado pela diferença na representação da bacia foi influenciado pelas diferenças entre os picos de vazão dos eventos. Os hidrogramas de saída apresentaram forte variação, sendo que o evento de menor magnitude produziu os piores resultados. Entretanto é importante ressaltar que a bacia hidrográfica foi representada de forma simplificada para os três cenários e apenas dois parâmetros foram devidamente ajustados.

Liong et al. (1993) aplicaram um modelo para encontrar valores ótimos globais para os parâmetros de calibração do SWMM, denominado *Knowledge-Based Storm Water Managemet Model* (KBSWMM2), a uma bacia hidrográfica de Singapura, com 6,11 km², dos quais 35% são áreas construídas. Para a realização do trabalho a bacia foi dividida em 19 sub-bacias.

O estudo se deu em duas etapas: calibração dos parâmetros e verificação. Para tanto, seis eventos de precipitação foram utilizados para o ajuste de oito parâmetros: coeficiente de rugosidade e capacidade de armazenamento em depressões das superfícies permeáveis, capacidades máxima e mínima e constante de decaimento de infiltração, largura, porcentagem de áreas impermeáveis e declividade das sub-bacias. Os resultados foram apresentados em termos dos desvios das vazões de pico (calculadas e observadas), através da maximização de uma função, visando a alcançar o valor máximo 1,0. Para as simulações de verificação foram utilizadas as médias dos parâmetros obtidos na etapa da calibração.

Os resultados das simulações apresentaram valores acima de 0,98 para a função avaliada, revelando que o modelo de otimização KBSWMM2 alcançou valores ótimos globais para os parâmetros, apresentando desempenho satisfatório e obtendo boa concordância entre as vazões de pico calculadas e observadas, tanto para a calibração, quanto para a verificação.

Zaghloul (1998) ajustou o bloco *Extran* do modelo SWMM para incluir o efeito da variação do coeficiente de manning em tubos circulares. Foram analisadas três bacias hidrográficas: Yarmouk, no Kuwait, com 0,48 km² de área (55% impermeável); Bannatyne, no Canadá, com 2,19 km² de área (36% impermeável); e Vine Street, na Austrália, com 0,7 km² de área (36% impermeável).

Para as três bacias analisadas, os hidrogramas com o coeficiente variável apresentaram características mais próximas aos hidrogramas observados, quando comparados com os hidrogramas produzidos com n constante. Como o autor apresentou apenas resultados gráficos, não foi possível analisá-los quantitativamente.

Bertoni (1998) aplicou o modelo SWMM a uma bacia da cidade de Rafaela no estado de Santa Fé, Argentina, com área de 15 km^2 . O objetivo perseguido por ele foi comparar os resultados da simulação matemática de uma cheia urbana sob condições de registros escassos com as informações correspondentes a uma cheia histórica, adotando para os parâmetros valores recomendados na literatura.

A bacia hidrográfica utilizada no estudo foi dividida em três setores: rural (somente áreas permeáveis), periurbano (12% de área impermeável) e urbano (50% de área impermeável), totalizando 51 sub-bacias. Para análise dos resultados, os valores obtidos foram comparados com dados pluviográficos, níveis máximos atingidos em diferentes seções do canal, tempos de início e fim da inundação, e outras informações recompiladas durante o desenvolvimento do trabalho. As simulações do modelo apresentaram valores satisfatórios para a representação da cheia, (representados apenas graficamente), embora Bertoni (1998) alerte para a necessidade de aprimoramento do ajuste dos parâmetros quando os dados hidrométricos forem escassos.

Hsu et al. (2000) combinaram o SWMM a um modelo bidimensional com o intuito de simular uma inundação devido à sobrecarga de vazão em Taipei, Taiwan. Para a realização do estudo foi selecionado um evento ocorrido em 1998 que ocasionou sérios problemas de inundação à cidade. O SWMM foi adotado para calcular o escoamento através do sistema de águas pluviais e os hidrogramas referentes às bocas-de-lobo afetadas pela vazão excedente à capacidade do sistema. Para obter informações detalhadas sobre as zonas de inundação foi utilizado o modelo bidimensional de escoamento superficial difusivo. Os resultados obtidos revelam que grande parte das regiões inundadas pôde ser satisfatoriamente simulada. O trabalho apresentado pelos autores pode auxiliar as autoridades a prevenir danos devidos às inundações, re-projetando e aumentando a capacidade de drenagem dos sistemas de águas pluviais. O modelo também pode ser aplicado para mapear o potencial de inundações visando estabelecer medidas de mitigação para o controle de cheias.

Camorani et al. (2005) analisaram os efeitos das mudanças quanto ao uso e ocupação do solo, com o auxílio do modelo SWMM, em relação aos riscos de inundação em uma bacia hidrográfica com $76,1 \text{ km}^2$ em Bolonha, na Itália. Para tanto a bacia foi dividida em 27 sub-

bacias, e foram comparados três cenários de ocupação (1955, 1980 e 1992) baseados em mapas digitais, e eventos de precipitação com períodos de recorrência de 10, 50 e 100 anos.

Os resultados das simulações comprovaram que as mudanças promovidas pela urbanização no uso e ocupação do solo aumentaram as vazões de pico em até 20% majorando os riscos de inundações. Os autores atentam para o fato de que as conseqüências mais marcantes ocorreram para os eventos menos raros (10 anos de recorrência), devendo haver, portanto, uma maior preocupação por parte das autoridades com os eventos mais freqüentes e menos severos.

Como essa pesquisa foi baseada somente em comparações de simulações hidrológicas, sem a utilização de hidrogramas observados, faz-se necessária a realização de uma investigação em relação às incertezas desse estudo, para torná-lo mais realístico.

Temprano et al. (2006) efetuaram a calibração hidráulica do SWMM para uma bacia em Santander, na Espanha de 0,56 km², dos quais 34% referem-se a áreas impermeáveis, tendo em vista a previsão da poluição em um sistema combinado de esgotos e águas pluviais.

A bacia hidrográfica foi discretizada em 246 sub-bacias e as simulações foram efetuadas a partir de três eventos de precipitação, para os quais foram coletados dados de escoamento da água. O processo de calibração foi realizado por tentativa e erro, visando ao ajuste de onze parâmetros hidráulicos, em função dos desvios de volume e picos de vazão. Os resultados produzidos pela calibração em relação aos picos de vazão foram em média 20% maiores em comparação aos valores observados, já os desvios de volume não ultrapassaram 4%, segundo os autores.

Denault et al. (2006) desenvolveram um estudo para verificar se as mudanças no ciclo hidrológico afetam as estruturas de drenagem, através de inundações, já que os elementos de micro-drenagem são projetados para suportar vazões limitadas. Foram examinados os impactos potenciais causados pelo futuro aumento da intensidade das chuvas de curta duração sobre a infra-estrutura urbana de uma bacia hidrográfica do Canadá, com 4,4 km² de área de drenagem, sendo aproximadamente 45% impermeável. O SWMM foi utilizado para avaliar os efeitos desse aumento sobre as vazões de pico consideradas nos projetos e a necessidade de expansão da capacidade das estruturas de drenagem. Cenários de precipitação foram criados para 2020 e 2050, a partir de análises de regressão linear das séries anuais máximas de curta duração, e utilizados como dados de entrada para o modelo.

Os resultados mostraram que, para a bacia em estudo, as mudanças hipotéticas do ciclo hidrológico não deverão causar impactos expressivos sobre a infra-estrutura de drenagem, já que esta apresentou capacidade suficiente para suportar os volumes de água

futuros previstos. Porém, essa conclusão não pode ser estendida a outras bacias hidrográficas sem a prévia realização do estudo adequado.

Garcia e Paiva (2006) aplicaram o modelo SWMM à bacia hidrográfica do Córrego Cancela, com área de drenagem de 4,5 km² e 34,6% de áreas impermeáveis. Os objetivos desse trabalho foram: a calibração dos eventos de cheia e a análise das mudanças ocorridas nos hidrogramas causadas pelo processo de urbanização para os anos 1980, 1992 e 2004.

Para caracterizar o processo de urbanização, as análises quanto ao uso e ocupação do solo foram determinadas a partir de fotos aéreas e imagens de satélite obtidas para os anos avaliados. A bacia, dividida em 18 sub-bacias, teve seis parâmetros do modelo calibrados manualmente, por tentativa e erro (coeficientes de rugosidade de manning e armazenamentos em depressão para superfícies permeáveis e impermeáveis; e capacidades iniciais e finais de infiltração) buscando a maximização de um coeficiente de correlação.

Os resultados produzidos pela calibração foram considerados satisfatórios pelos autores, variando de 0,93 a 0,98, sendo 1,0 o valor máximo buscado. A análise de uso e ocupação do solo evidenciou que a bacia encontra-se em processo de urbanização acelerado. Os aumentos de volume escoado e vazão de pico apresentados pelas simulações alcançaram 49% e 41%, respectivamente, para o período de 1992 a 2004, apontando para necessidade de planejamento do uso e ocupação do solo em áreas com crescimento urbano expressivo.

Jang et al. (2007) propuseram a utilização do SWMM para modelar condições anteriores e posteriores ao desenvolvimento urbano para três diferentes bacias da Coreia, com áreas de 9km², 34km² e 56km². Os autores enfatizam que, em estudos como esses, normalmente são utilizados dois modelos distintos, um para a condição anterior à urbanização e outro para a condição resultante da urbanização. Entretanto, esse procedimento pode gerar resultados insatisfatórios e dificultar a simulação, devido às diferenças entre os modelos.

Para poder realizar o trabalho, os autores primeiramente testaram a aplicabilidade do SWMM para condições naturais (pré-urbanização), comparando os seus resultados aos obtidos pelo Método de Clark (método padrão para bacias sem registros na Coreia). Os parâmetros do modelo não foram calibrados, mas estimados a partir de informações disponíveis e valores sugeridos pela literatura. Os resultados obtidos, em termos dos picos de vazão, foram considerados favoráveis à aplicação do modelo, já que se aproximaram muito dos observados, apresentando desvio médio de 8,4% e demonstrando melhor desempenho comparado ao Método de Clark, cujo desvio médio foi da ordem de 18,7%.

Jang et al. (2007) aplicaram então o SWMM para condições pré e pós-desenvolvimento para locais onde dois diferentes modelos já haviam sido aplicados, com o

objetivo de corrigir os erros encontrados. O resultado mostrou-se satisfatório, corrigindo os valores de vazão de pico, que, em alguns casos, com os modelos anteriores se apresentavam maiores para as condições anteriores ao desenvolvimento urbano.

3.3 Calibração dos Modelos Hidrológicos

Os modelos de transformação chuva-vazão possuem diversos parâmetros que caracterizam o sistema a ser representado. Muitos desses parâmetros não podem ser medidos ou não são monitorados em determinadas bacias hidrográficas, portanto devem ser estimados ou obtidos através do processo de calibração.

A calibração pode ser definida como o processo de busca dos valores ótimos dos parâmetros do modelo hidrológico, ou seja, é um processo de otimização no qual as variáveis de decisão são os parâmetros do modelo (BRAVO ET AL., 2007). O objetivo do processo de calibração assim concebido é encontrar valores calculados próximos aos valores observados das variáveis de saída do modelo, tais como vazão, volume escoado e tempo de pico, através da minimização ou maximização de função (objetivo único) ou funções (multiobjetivo) que expresse(m) os desvios entre os valores calculados e observados correspondentes.

Existem diversas técnicas de calibração. A calibração manual por tentativa e erro foi uma das primeiras técnicas utilizadas em modelos de chuva-vazão. Trata-se de um processo iterativo, segundo o qual o usuário modifica manualmente o conjunto de parâmetros, até encontrar valores satisfatórios para os desvios. A vantagem dessa técnica está no aproveitamento da experiência do usuário sobre o comportamento do modelo. Entretanto, para modelos complexos, com grande número de parâmetros a serem calibrados, o processo iterativo torna-se demasiadamente longo e pouco eficaz (COLLISCHONN & TUCCI, 2001).

Buscando aceleração e maior eficiência do processo de calibração, foram desenvolvidas inúmeras técnicas de otimização apoiadas pelo uso intensivo de computadores, caracterizando a calibração automática dos parâmetros.

A calibração automática de modelos chuva-vazão utiliza funções objetivo que avaliam o desempenho da simulação, comparando hidrogramas de saída observados e calculados. A literatura especializada (BRAVO ET AL., 2007; PORTO ET AL., 2008) apresenta diversas funções objetivo que podem ser utilizadas durante o processo de calibração, cabe aos usuários

escolher aquela que melhor se adéqua ao problema em questão. Quando somente uma função objetivo é analisada, chamamos o processo de calibração de objetivo único, porém, pode-se optar pela utilização de diferentes funções objetivo combinadas ou simultaneamente, neste caso, calibração multiobjetivo.

Para encontrar o conjunto de parâmetros que otimiza a função objetivo, deve-se utilizar um algoritmo de otimização de busca local ou global. Os algoritmos de busca local são rápidos e eficientes para as funções que possuem somente um ponto ótimo, portanto podem não produzir resultados satisfatórios para a calibração de modelos hidrológicos, pois suas funções objetivo normalmente apresentam superfícies de resposta multimodais (COLLISCHONN & TUCCI, 2001). Dessa forma recomenda-se o uso de algoritmos de otimização de busca global, que percorrem as superfícies de resposta de maneira estocástica, buscando encontrar o ótimo global.

Dentre os algoritmos de otimização de busca global mais utilizados na calibração de modelos hidrológicos encontram-se os algoritmos genéticos, que vêm apresentando resultados bastante satisfatórios. Trata-se de uma classe particular dos algoritmos evolutivos, que utiliza técnicas inspiradas na biologia evolutiva, como hereditariedade, mutação, seleção natural e recombinação.

3.4 Nível de Detalhamento Espacial

Diferentemente dos modelos concentrados, os modelos hidrológicos distribuídos permitem considerar a variabilidade espacial das características das bacias hidrográficas. Apesar do aumento da discretização espacial das bacias admitir processos hidrológicos mais complexos, ampliando a precisão dos modelos, aumenta os esforços computacionais e de modelagem de uma forma geral.

Buscando encontrar o equilíbrio entre a discretização das bacias e os esforços empreendidos, vários trabalhos tentam verificar o nível de detalhamento mais adequado a diversos sistemas. Entretanto, as conclusões são contraditórias, mostrando a necessidade de mais estudos.

Zaghloul (1983), com o uso do modelo hidrológico SWMM, buscou analisar diferentes níveis de discretização utilizados para representar bacias hidrográficas urbanas,

avaliando os efeitos da redução do número de sub-bacias sobre a precisão da simulação da transformação chuva-vazão para quatro bacias distintas, com áreas de drenagem entre 0,04 e 2,19 km².

Para realização do trabalho foram propostas três resoluções para as bacias hidrográficas. Uma bastante detalhada, que continha toda rede de micro-drenagem existente e um grande número de sub-bacias, outra mais simplificada, que considerava somente uma parcela da micro-drenagem e menor número de sub-bacias. A terceira resolução não admitia propagação em condutos, analisando a bacia como um todo, sem qualquer subdivisão. Na tentativa de obter hidrogramas resultantes similares para as diferentes representações, o autor definiu as sub-bacias da resolução simplificada como sendo um agrupamento de diversas sub-bacias da resolução detalhada. Assim, as características físicas da primeira foram calculadas através da média ponderada das características da segunda, exceto pela largura, que foi definida como a soma das larguras de cada sub-bacia do agrupamento. A largura da bacia única da terceira resolução foi calculada através de uma metodologia proposta pelo autor que visava reduzi-la de forma a compensar o armazenamento dos condutos.

O autor testou essa metodologia em quatro bacias hidrográficas. A primeira, localizada em Chicago, Estados Unidos, com 0,04 km² de área e 46% de impermeabilidade, foi submetida a duas resoluções: a mais detalhada, com 80 sub-bacias e micro-drenagem; e outra, bastante simplificada, com uma única bacia e somente escoamento superficial. Ambas as resoluções simularam hidrogramas praticamente idênticos, provando que, em pequenas áreas, a propagação em condutos é insignificante, tornando possível a simplificação da bacia sem que haja perdas de qualidade nos resultados. A segunda bacia avaliada, também nos Estados Unidos, situa-se em Baltimore, tem 0,19 km² e 68% de áreas impermeáveis. Foi dividida em 12 e 5 sub-bacias, considerando a micro-drenagem e utilizando a metodologia descrita anteriormente. O hidrograma simulado com a resolução mais simples, de 5 sub-bacias, apresentou picos de vazão ligeiramente superiores ao hidrograma resultante da modelagem com 12 sub-bacias. Para os dois casos descritos o autor não apresentou resultados numéricos, somente gráficos.

A terceira sub-bacia submetida à análise localiza-se em Melbourne, Austrália, apresenta área de drenagem de 0,70 km² e 46 % de impermeabilidade. Mais uma vez Zaghloul (1983) testou duas resoluções: uma com 51 sub-bacias e outra com 12, ambas admitindo a micro-drenagem. O hidrograma simulado com 12 sub-bacias apresentou vazão de pico 20% superior ao simulado com 51. Por fim, a última e a maior bacia hidrográfica utilizada no estudo situa-se em Winnipeg, no Canadá, tem 2,19 km² e 36% de áreas impermeáveis, e foi

submetida a três diferentes representações: 41, 3 e 1 sub-bacias. A resolução mais detalhada apresentou picos de vazão simulados 10% e 20% menores que as demais resoluções, respectivamente.

O autor acredita que os resultados obtidos mostraram que quanto maior a área total da bacia, maiores as discrepâncias entre os hidrogramas das resoluções, ou seja, para pequenas áreas, a propagação em condutos é insignificante, podendo ser utilizada a representação da bacia de corpo único. Entretanto, é pertinente observar que a precisão da simulação foi mantida porque os parâmetros das representações simplificadas foram calculados de maneira a equivaler as características hidráulicas das resoluções detalhadas, porém, não há provas de que essa metodologia esteja correta. O autor ainda enfatiza que a representação simplificada das bacias reduz os esforços computacionais e operacionais, entretanto deve ser aplicada somente como ferramenta de planejamento e não de projeto.

Kalin et al. (2003) investigaram o efeito da resolução geomorfológica sobre os hidrogramas de duas bacias hidrográficas experimentais, com o objetivo principal de desenvolver uma relação quantitativa entre vazão de pico, características da bacia e precipitação. As bacias hidrográficas adotadas como objeto de estudo estão localizadas no estado norte-americano de Iowa e possuem 0,33 e 0,42 km² de área, a porcentagem de áreas impermeáveis não foi mencionada pelos autores.

Para determinar os níveis de detalhamento da rede de drenagem os autores especificaram uma área crítica, baseada em leis geomorfológicas, distribuição de probabilidades e propriedades da bacia. Essa área funcionou como uma área mínima de contribuição dos canais, ou seja, os canais com áreas de contribuição inferiores as áreas mínimas eram desconsiderados, sendo retirados da rede de drenagem. Variando então o valor da área crítica foram obtidas quatro diferentes resoluções, com diferentes valores de densidade de drenagem: 4,41; 3,62; 2,65 e 0,98 km⁻¹.

Para a realização das simulações foram escolhidos eventos de precipitação com altos valores de período de retorno e foi utilizado o modelo hidrológico KINEROS, distribuído, determinístico e fisicamente fundamentado, que requer que a bacia hidrográfica esteja dividida em planos de escoamento superficial e segmentos de canais homogêneos.

Os resultados obtidos mostraram que quanto maior for o nível de detalhamento, maior será a vazão de pico, alcançando valores até 40% superiores. Já o tempo de pico não apresentou variações significativas, exceto para o caso em que somente o escoamento superficial foi considerado, desprezando a propagação em canais, no qual o tempo de pico encontrado apresentou um valor bastante elevado.

Kalin et al. (2003) verificaram também que com o aumento da densidade de drenagem as diferenças entre as vazões de pico diminuíram, quase alcançando valores constantes, sugerindo a existência de um valor ótimo de resolução da bacia, que represente satisfatoriamente a realidade. Baseados nessa hipótese os autores desenvolveram uma relação empírica entre a resolução da rede de drenagem, as características da bacia hidrográfica e as propriedades climáticas, ressaltando que essas hipóteses são válidas apenas para eventos com valores de período de retorno maiores que 2,8 anos.

Garcia e Paiva (2006) realizaram um estudo da influência do grau de discretização da bacia hidrográfica utilizando o modelo hidrológico SWMM. A bacia do Arroio Cancela, localizada em Santa Maria, RS, adotada como objeto de estudo, possui 4,95 km² de área de drenagem e 34,6% de taxa de impermeabilidade.

Foram analisadas duas diferentes discretizações da bacia, denominadas: *detalhada* e *simplificada*, definidas a partir das informações referentes ao sistema de drenagem existente e análises de uso e ocupação do solo. Para a representação detalhada a bacia foi dividida em 18 sub-bacias e 23 trechos de condutos (entre micro e macro-drenagem), enquanto que a simplificada apresentava apenas 6 sub-bacias e 4 trechos de canais naturais (macro-drenagem). Por se aproximar mais da situação real da bacia hidrográfica, os autores optaram por calibrar somente a discretização detalhada, utilizando os valores médios obtidos com a calibração para as simulações e posteriores análises das diferentes representações da bacia. Os eventos utilizados nas simulações apresentavam alta intensidade, porém, segundo os registros, não causaram inundações.

Os hidrogramas resultantes apresentaram valores de vazão de pico superiores para a discretização simplificada, superando em média 18,5% os valores obtidos para a representação detalhada. Garcia e Paiva (2006) atribuem essa diferença à redução do armazenamento presente nos condutos.

Moussa (2008), com auxílio do Modelo de Elevação Digital, analisou o efeito da discretização espacial de sete bacias hidrográficas sobre o hidrograma, em função de quatro propriedades hidrológicas: número de nascentes, comprimento total da rede de canais, comprimento do canal principal e área total de drenagem. As bacias hidrográficas analisadas nesse estudo estão localizadas no sul da França e têm seus exutórios no Mar Mediterrâneo. Elas foram selecionadas em virtude da geometria, topologia e dos parâmetros hidráulicos e meteorológicos e apresentam áreas que variam de 738 a 5346 km².

Para determinar os níveis de segmentação das bacias foi determinado um valor de área crítica e, assim como em Kalin et al. (2003), essa área funcionou como uma área mínima de

contribuição dos canais, ou seja, os canais com áreas de contribuição inferiores as áreas mínimas eram desconsiderados, sendo retirados da rede de drenagem. Em uma primeira análise, o autor considerou a chuva constante no espaço e adotou dois diferentes valores de área crítica: 2 km² e uma área tal que a bacia hidrográfica fosse dividida em apenas três sub-bacias. As simulações foram comparadas entre si em termos do coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970), resultando em valores superiores a 0,95 para todas as bacias hidrográficas e hidrogramas muito semelhantes, graficamente. Como o valor máximo buscado para o coeficiente de eficiência é igual a 1,00, Moussa (2008) concluiu que o sistema de drenagem pode ser simplificado quando for possível admitir que a chuva não varie espacialmente.

Em outra análise o nível de segmentação foi avaliado para áreas críticas de 1, 2 e 4 km² e chuva espacialmente distribuída em função da altitude. Os resultados apresentados, em função das vazões máximas, mostram que o formato do hidrograma é bastante sensível ao valor da área crítica e à distribuição da chuva, e que os picos de vazão aumentaram para representações menos detalhadas, de 8 a 23%, para as diferentes bacias analisadas. Então, segundo o autor, quando há variação espacial da chuva, devem-se buscar maiores detalhamentos das bacias, a fim de melhor representá-las. Moussa (2008) não comparou os hidrogramas simulados a registros observados, não havendo, portanto, conclusões a respeito de quais segmentações das bacias se aproximaram mais da realidade.

Park et al. (2008) avaliaram a influência do grau de segmentação das bacias e da resolução espacial da rede de drenagem nas respostas produzidas pelo SWMM em áreas urbanas, avaliando o comportamento dos hidrogramas na seção de saída de uma bacia hidrográfica com aproximadamente 0,73 km² e 86% de áreas impermeáveis.

Para tanto o modelo foi aplicado a três diferentes casos experimentais. O Caso 1 incluía a rede de drenagem existente em sua totalidade, sendo, portanto, o caso mais próximo à realidade, e dividia a bacia em 39 sub-bacias. O Caso 2 continha 38 sub-bacias e, para definir as galerias pluviais a serem consideradas, foi determinado, dentre os diâmetros das galerias existentes, o valor da moda e admitidas somente galerias cujos diâmetros fossem maiores que esse valor. Por fim, o Caso 3 consistia somente das galerias cujos diâmetros fossem maiores que o valor da moda do Caso 2 e de 23 sub-bacias.

Por ser mais compatível com a realidade e possivelmente produzir resultados mais similares aos observados, os autores optaram por utilizar o Caso 1 durante o processo de calibração. Os parâmetros calibrados foram aqueles que não poderiam ser estimados através de mapas digitais ou fotos aéreas. A calibração resultou em um valor de 0,78, em termos de

um coeficiente cujo desempenho ideal seria igual a 1,0. Posteriormente, de posse dos parâmetros calibrados, os três casos foram submetidos à simulação. Os resultados obtidos foram comparados e analisados em termos do volume total de descarga no final da rede de drenagem, sendo que a diferença nos valores de volume ficou abaixo de 10%, permitindo concluir que os efeitos advindos da resolução espacial e do grau de segmentação das bacias não se mostraram significativos à reprodução dos volumes, podendo ser controlados através do ajuste dos parâmetros do modelo. É importante ressaltar que os autores não avaliaram as diferenças nos picos de vazão, mais sensíveis às mudanças na representação da rede do que os volumes totais.

A Tabela 3-4 a seguir apresenta um resumo dos trabalhos e metodologias empregados para avaliar os diferentes níveis de detalhe na adequada representação da bacia hidrográfica.

Tabela 3-4 – Resumo dos trabalhos sobre níveis de detalhamento

Autor(s) / Ano	Área (km ²)	AI (%)	Metodologia	Modelo
Zaghloul (1983)	0,04	46	Redução do número de sub-bacias	SWMM (Huber & Dickinson, 1992)
	0,19	68		
	0,70	46		
	2,19	36		
Kalin et al. (2003)	0,33	Ñ. M.*	Área crítica de contribuição dos condutos	KINEROS (Woolhiser et al., 1990)
	0,42			
Garcia e Paiva (2006)	4,95	34,6	Homogeneidade de uso e ocupação do solo	SWMM (Huber & Dickinson, 1992)
Moussa (2008)	738 a 5346	Ñ. M.*	Área crítica de contribuição dos condutos	GIUH - DEM
Park et al. (2008)	0,73	86	Valor da moda entre os diâmetros	SWMM (Huber & Dickinson, 1992)

* Valores de áreas impermeáveis não mencionados

3.5 Estudo de Caso – São Carlos

Urbanização

No Brasil, como dito anteriormente, algumas cidades vêm lutando contra as dificuldades advindas da urbanização. A cidade de São Carlos, SP, vem enfrentando, há alguns anos, sérios problemas de inundações em sua área central. Localizada no centro geográfico do estado de São Paulo, São Carlos possui cerca de 220 mil habitantes e

crescimento demográfico de 2,4 % ao ano (PMSC, 2007). O crescimento e a distribuição da população são carlense em áreas rurais e urbanas, entre os anos de 1940 a 2000, podem ser visualizados na Tabela 3-5 e na Figura 3-2.

O Córrego do Gregório possui parte de sua bacia hidrográfica situada urbanizada que inclui o centro comercial do Município, conhecida como “região do Mercado Municipal de São Carlos” (MMSC). Em situações de chuvas mais severas, o córrego deixa sua calha, canalizada naquele trecho, e inunda avenidas e ruas ribeirinhas, causando prejuízos às edificações mais próximas (ANTONIO & ANDRADE, 2007).

Tabela 3-5 - População de São Carlos (Rural e Urbana) entre 1940 e 2000

Ano	População				
	Total (hab)	Urbana (hab)	Rural (hab)	Urbana (%)	Rural (%)
1940	48609	25746	22863	52,97	47,03
1950	47731	32703	15028	68,52	31,48
1960	62045	50851	11194	81,96	18,04
1970	85425	75739	9686	88,66	11,34
1980	119542	110235	9307	92,21	7,79
1991	158221	148408	9813	93,80	6,20
2000	192923	183369	9554	95,05	4,95
2008*	220425	-	-	-	-

* Valor retirado da PMSC, 2007

Figura 3-2 - Distribuição da População de São Carlos entre 1940 e 2000.

Fonte: IBGE – Censos Demográficos de 1940 a 2000.

Barros et al. (2007) relatam que na região do MMSC ocorrem em média de quatro a cinco grandes enchentes por ano, com prejuízos aproximados de R\$90.000,00 em cada evento.

Por essa razão a bacia urbana do Córrego do Gregório foi escolhida como objeto de estudo desse trabalho. Ela está entre as 14 bacias urbanas localizadas nas nascentes do Rio Monjolino, afluente do Jacaré-Guaçu. A bacia apresenta 18,88 km² de área de drenagem, com 8,999 km de comprimento axial. A ocupação do solo é de 60% de áreas urbanas e 40% de espaços abertos (ESTEVES, 2003).

Diversos trabalhos têm sido realizados com o intuito de buscar soluções para o problema de inundação da cidade de São Carlos, SP, alguns desses serão comentados a seguir.

Modelos hidrológicos desenvolvidos para São Carlos

Machado (1981) desenvolveu um modelo hidrológico determinístico (MHUD) para bacias urbanas com o objetivo de simular hidrogramas de enchentes causadas por precipitações de alta intensidade e curta duração. O modelo, classificado pelo autor como determinístico-conceitual, não-linear, geometricamente distribuído, foi desenvolvido com base na literatura existente na época sobre o tema e calibrado com base em hidrogramas e linigramas observados na Bacia do Córrego do Gregório, em São Carlos, SP, com área de drenagem de 15,6 km² e 28,8% de áreas impermeáveis.

A bacia foi dividida em sub-bacias de acordo com a topografia dos terrenos, o traçado urbanístico e a rede de galerias pluviais do município. A parte não urbanizada foi representada por sub-bacias conectadas diretamente a canais (secundários ou principais), não havendo a possibilidade de transferência do escoamento de uma sub-bacia a outra. Para representar a porção urbana da bacia, além das sub-bacias, foram considerados as sarjetas, galerias e canais. Por não ser permitido o escoamento superficial de uma sub-bacia a outra, o escoamento gerado era transmitido diretamente para as sarjetas. Os processos hidrológicos simulados pelo modelo foram: precipitação espacialmente variável (porém a variação se restringe a pontos pertencentes ao canal principal), retenção superficial, infiltração, geração e propagação do escoamento superficial e propagação da onda de cheia no canal.

Para simular o processo de transformação de chuva em vazão, o modelo proposto calculou a infiltração potencial através de uma modificação na equação de *Horton*, que a tornou uma função da umidade do solo. As demais perdas foram simuladas por um sub-

modelo de retenção superficial baseado em uma equação de decaimento exponencial. A propagação do volume de água excedente foi calculada por modelos de onda cinemática linear para escoamento em superfícies e sarjetas e não-linear para propagação em galerias e canais. Uma característica bastante interessante do modelo do Machado (1981) é a capacidade de localizar espacialmente galerias afogadas, permitindo diagnosticar pontos de estrangulamento dentro da rede de drenagem. Porém, quando as galerias têm suas capacidades superadas pelo volume propagado, armazenam o excesso, liberando-o em instantes seguintes, o que, por sua vez, prejudica a simulação, já que na realidade o volume excedido escoaria superficialmente pelas ruas e sarjetas.

Para adquirir um conhecimento adequado do modelo e facilitar a calibração, o autor optou por realizar os testes de sensibilidade, tomando por base uma bacia hipotética. Os testes foram feitos com todos os parâmetros envolvidos e com os dados de entrada do modelo, todos variando em uma faixa de -80% a +80%. A sensibilidade do modelo foi verificada através de quatro tipos de erro: erro de continuidade, erro de volume, erro de tempo de pico e erro de vazão de pico. Para Machado (1981) os resultados encontrados foram positivos, sendo que os erros mais sensíveis foram os erros de volume e de vazão de pico, que chegaram a 56,12% e 43,68%, respectivamente, quando da variação do coeficiente de rugosidade.

Após os testes de sensibilidade, ocorreu a calibração do modelo, com eventos relativos a chuvas homogeneamente distribuídas no espaço. O processo de calibração manual se deu em duas etapas: a primeira buscava a concordância dos volumes totais escoados, a partir da variação das capacidades de infiltração e retenção; já a segunda procurava realizar ajustes de forma dos hidrogramas, relacionados às vazões e tempos de pico, através da modificação nos valores de rugosidades e declividades (dos canais e sub-bacias). Além dos erros já citados, foi adotado um erro médio absoluto em relação à vazão de pico observada para avaliar as respostas do modelo. Segundo Machado (1981), os resultados apresentaram erros satisfatórios, sendo os maiores valores encontrados para os desvios iguais a 9,7% (volume), 11,1% (vazão de pico) e 16,67% (tempo de pico).

Barbassa (1991) aperfeiçoou, significativamente, o modelo hidrológico urbano distribuído desenvolvido por Machado (1981), tendo em vista ampliar suas possibilidades de utilização. As modificações hidráulico-hidrológicas do modelo realizadas foram as seguintes: criação de um modelo de variação espacial da precipitação, permitindo o posicionamento da célula convectiva em diversos pontos do canal principal; análise do efeito da variação temporal da intensidade da precipitação, através da aplicação de diferentes períodos de retorno; separação das áreas das sub-bacias em permeáveis e impermeáveis, para

aperfeiçoamento da geração do escoamento superficial, desconsiderando a infiltração em áreas impermeáveis diretamente conectadas (como os arruamentos); e elaboração de um modelo de propagação do escoamento em canais baseado nas equações completas de *Saint Venant*.

A fim de testar a nova metodologia, o autor aplicou-a à bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, São Carlos, SP, simulando com os dados referentes a 1980, para efeitos de comparação ao trabalho de Machado (1981). Considerando a chuva uniforme no espaço e a separação das áreas em permeáveis e impermeáveis o modelo modificado apresentou melhora nos resultados em 50% quanto à vazão de pico, porém ainda muito distante do hidrograma observado. Já com a incorporação da variabilidade espacial da chuva proposta os resultados foram muito positivos, com desvio de pico máximo da ordem de 15%. Os resultados revelaram que as mudanças sugeridas para o modelo hidráulico-hidrológico mostraram-se adequadas, permitindo representar ainda melhor os processos físicos das bacias, facilitando a reprodução dos valores medidos em campo.

Silva (1998) com o intuito de aprimorar as técnicas de simulação e previsões de inundações, desenvolveu um modelo hidrológico distribuído e estocástico de transformação de chuva em vazão para ser aplicado a bacias urbanas, atendendo à necessidade de se considerar a natureza aleatória dos parâmetros.

A bacia hidrográfica utilizada para o desenvolvimento do modelo foi a bacia urbana do Córrego de Santa Maria Madalena, em São Carlos, SP. O modelo proposto fundamentou-se na equação matemática diferencial de escoamento cinemático em canais, aproximada pelo método de diferenças finitas simples, e, para aproximar a área de estudo, utilizou a discretização de elementos finitos triangulares. A análise de incertezas foi realizada através de equações integrais estocásticas.

Os resultados revelaram que o modelo pode ser utilizado no planejamento da ocupação urbana da bacia, e também para o dimensionamento de sistemas de galerias e análise do comportamento hidráulico de redes existentes.

Silva (2003) desenvolveu um modelo hidrológico urbano distribuído, denominado HIDRORAS, integrado a sistema de informações geográficas, e testou sua aplicabilidade à parcela mais de montante da bacia do Córrego do Gregório, em São Carlos, SP, com aproximadamente 10km² de área drenante.

Considerando que a área da bacia pudesse ser representada por células derivadas de um Modelo Numérico de Terreno, buscou-se elaborar um modelo de alta resolução, capaz de representar a bacia hidrográfica, incorporando a variação espaço temporal da precipitação e

espacial da condutividade hidráulica do solo. O modelo também se fundamentou nos seguintes planos de informação: escoamentos de superfície e em galerias pluviais (sem pressão). A aplicação do modelo proposto sobre a bacia do Gregório apresentou resultados positivos, com coeficientes de correlação entre os hidrogramas observados e calculados variando de 0,80 a 0,95 (quando 1,00 é o valor ideal buscado). Entretanto, observou-se que as diferentes resoluções de precipitação alteraram os picos de vazão em até 100%.

Barbassa et al. (2005) apresentaram aprimoramentos para o modelo hidrológico urbano distribuído proposto por Machado (1981) e modificado por Barbassa (1991), denominado MHUDII. As mudanças efetuadas abrangem: representação da rede de drenagem, modelagem do escoamento pelas sarjetas e propagação pelos canais e a precipitação.

Para representar a rede de condutos (canais, galerias e sarjetas), na entrada dos dados, não há mais limitações de ramificação ou a necessidade de classificar os canais (primário ou secundário) e as sarjetas passaram a exigir os mesmos parâmetros dos demais condutos, melhorando a representatividade. O escoamento superficial e a propagação em canais, que antes eram modelados de acordo com as equações de Manning e da continuidade, foram modificados para admitir onda cinemática variável temporal e espacialmente. Outra alteração muito pertinente refere-se ao excedente à capacidade dos condutos, que antes tinha a propagação retardada, e depois das mudanças passou a ser desviado para as sarjetas e ruas, como realmente ocorre. Por fim, a distribuição espacial da precipitação foi garantida através da combinação de coordenadas geográficas dos postos pluviográficos e dos centróides das sub-bacias, e da liberdade para dimensionar as células convectivas.

A aplicação do modelo à bacia do Gregório em São Carlos, SP, incorporou a captura dos dados de entrada através de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e contou com a calibração manual dos parâmetros. As simulações resultaram em bons desempenhos, obtendo valores médios dos desvios de tempo e vazão de pico de 4,2 e 13,9%, respectivamente, e de volume de 13,8%, comprovando que as mudanças efetuadas aumentaram a capacidade do MHUDII em simular hidrogramas resultantes do processo de transformação chuva-vazão.

Drenagem urbana em São Carlos

Barbassa (1991) aperfeiçoou o modelo MHUD proposto por Machado (1991) e aplicou sobre as bacias do Córrego do Gregório e do Monjolinho, a fim de avaliar o crescimento urbano do município de São Carlos, SP, submetido a eventos de precipitação

com diferentes períodos de retorno. Através de levantamento aerofotogramétrico foram elaborados cenários dos anos de 1980 e 1990, permitindo a avaliação da expansão urbana da cidade durante esse período, e propostas duas novas projeções, para o ano de 1990, simulando o aumento da taxa de impermeabilização das áreas urbanas e rurais das bacias.

Os hidrogramas simulados, para a bacia do Gregório, revelaram um aumento próximo a 20% na vazão de pico entre os anos 1980 e 1990, mostrando que a transformação da bacia fez com que um evento com período de retorno de 10 anos em 1980 acarretasse em conseqüências equivalentes a um evento de 5 anos de recorrência em 1990. As elevações nas taxas de impermeabilização propostas aumentaram as vazões de pico em até 25% (áreas urbanas) e 50% (áreas urbanas e rurais), para os eventos raros, ressaltando a importância do planejamento urbano.

Queiroz e Souza (1997) compararam diferentes situações de uso e ocupação do solo em uma sub-bacia rural da bacia do Córrego do Gregório, através da integração de um modelo hidrológico distribuído com Sistema de Informações Geográficas (SIG), com a finalidade de obter informações sobre os cenários mais adequados para as áreas com potencial para a urbanização. A parcela da bacia aplicada no estudo equivale a 7,37% do total e possui aproximadamente 1km² de área, sem áreas impermeáveis significativas.

Para realização do trabalho a bacia rural foi supostamente urbanizada, dentro dos padrões de ocupação encontrados no perímetro urbano do município de São Carlos. O modelo hidrológico aperfeiçoado por Barbassa (1991) foi utilizado e o SIG foi empregado para compilação das características físicas da bacia, construção dos cenários e como processador dos dados de entrada do modelo. Os cenários propostos foram baseados em legislações existentes para disciplinamento do uso do solo urbano e em medidas clássicas citadas em livros de drenagem urbana. Foram avaliadas seis medidas, como segue: presença de 40% de áreas permeáveis dentro dos lotes; retificação dos canais naturais; preservação da mata ciliar paralela aos cursos d'água; 5% da área total do loteamento destinada a áreas verdes; e mínimo de 30% de áreas verdes em locais públicos.

Os resultados demonstraram que o impacto negativo causado pela retificação dos canais (aumentos em 97% das vazões de pico) é bastante superior ao impacto positivo advindo das medidas de controle empregadas (redução máxima da vazão de pico de 31%). Entretanto é importante ressaltar que uma ocupação mais adequada dos loteamentos urbanos pode reduzir os impactos gerados pela urbanização sobre o sistema de drenagem, reduzindo também os custos futuros com medidas corretivas que poderiam vir a ser obrigatórias.

Oliveira (1999) discutiu a importância e a possibilidade da adoção de medidas não estruturais compatíveis com medidas estruturais para conter enchentes na bacia do Córrego do Gregório, em São Carlos, SP.

Através do uso de materiais cartográficos reproduzidos e manipulados por Sistemas de Informações Geográficas (SIG), trabalhos de campo e informações disponíveis na literatura sobre drenagem urbana e medidas de contenção de enchentes, a autora pôde refletir sobre a problemática do adensamento urbano frente aos atributos naturais e ao disciplinamento do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica, tornando possível a sugestão de medidas para controlar as inundações urbanas, tais como: aumento da rugosidade do leito dos canais, implantação de áreas verdes em setores já densamente ocupados, preservação de áreas de fundo de vale com vegetação, disciplinamento de uso e ocupação do solo, entre outras.

Boldrin et al. (2005) analisaram a influência da urbanização sobre o escoamento superficial na bacia do Córrego do Gregório, através de simulações de diversos cenários urbanísticos, com a finalidade de criar uma ferramenta de planejamento urbano, enfatizando a importância da preservação de áreas verdes na redução das vazões de pico e na manutenção da biodiversidade e harmonia ambiental local.

Para a realização do estudo os autores propuseram três diferentes cenários urbanos, um cenário atual (2004) e dois futuros, com e sem adição de medidas complementares não estruturais, como a conservação de áreas verdes e o disciplinamento do uso e ocupação do solo. O cenário atual foi avaliado com base em fotografias aéreas e levantamentos aerofotogramétricos. Já os cenários futuros seguiram as diretrizes do Projeto de Lei do Plano Diretor do Município de São Carlos. O modelo hidrológico empregado nas simulações foi o modelo desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, o IPHS-1. O cenário de 2004 foi utilizado para a calibração e validação dos parâmetros do modelo e a análise dos cenários foi realizada para chuvas de projeto com períodos de retorno de 10, 25 e 50 anos.

Os resultados obtidos através das simulações evidenciaram a importância da existência de áreas verdes em um sistema de drenagem no combate às enchentes, que, além de colaborar com a harmonização ambiental local, atuaram na redução das vazões máximas da ordem de 14% e contribuíram para promover o afastamento da população das áreas de risco.

Barros et al. (2007) propuseram prever a vazão na bacia urbana do Córrego do Gregório, com o objetivo de realizar o mapeamento das enchentes da região, comparando os resultados do modelo concentrado IPHS-1 e do modelo distribuído HIDRORAS.

Foram simulados cinco cenários futuros com diferentes graus de urbanização, obtidos com o auxílio de imagens de satélite. Para uma adequada calibração dos parâmetros os autores utilizaram eventos monitorados entre Janeiro/2000 e Março/2000. Para a simulação, foram utilizados eventos de precipitação com tempos de duração de 30 e 60 minutos e diversos períodos de retorno.

Os parâmetros de condutividade hidráulica saturada e de rugosidade obtidos da calibração do modelo distribuído (HIDRORAS) apresentaram alto grau de incerteza. As simulações realizadas com esse modelo também forneceram vazões até 100% maiores que aquelas produzidas pelas simulações com o modelo concentrado. O modelo IPHS-1 apresentou resultados satisfatórios quanto à delimitação das áreas inundáveis, tendo sido ressaltada pelos autores a importância do grau de urbanização sobre os picos de vazão em pontos inundáveis da bacia.

Mendes e Mendiondo (2007) estabeleceram a relação entre o processo histórico de expansão urbana e a incidência de inundações para a bacia do Córrego do Gregório a partir da recuperação histórica de notícias de jornal, procurando fornecer informações para prática de medidas mitigadoras e para elaboração de cenários futuros em São Carlos, SP.

Em conjunto com a Secretaria Municipal de Habitação e Desenvolvimento Urbano de São Carlos (SMH DU) foi elaborado o mapa de expansão urbana da cidade de 1940 a 2002. Em seguida foram calculadas as áreas loteadas para cada período, possibilitando avaliar a urbanização da bacia. Para complementar o estudo, os autores realizaram um levantamento das notícias de jornal sobre ocorrências de inundações na área em questão para o mesmo período.

Os resultados obtidos em relação à expansão urbana revelam que a área urbana loteada da cidade aumentou, entre 1940 e 2002, em $3,2 \text{ m}^2/\text{hab.ano}$. A bacia do Córrego do Gregório apresentou intensa e acelerada urbanização no período entre 1950 e 1970. Nas décadas seguintes essa expansão urbana se deu com menor velocidade, tendendo à estabilização a partir de 1990. Comparando estes valores com os dados de ocorrência de enchentes na bacia, Mendes e Mendiondo (2007) concluíram que os impactos ocasionados por inundações foram agravados pela ocupação urbana e pela falta de ordenamento territorial nas áreas ribeirinhas, demonstrando a necessidade da existência de uma nova abordagem da drenagem urbana nas tomadas de decisão para o planejamento futuro de São Carlos, SP.

Andrade e Mendiondo (2007) aplicaram um modelo de previsão quantitativa de chuva, em curto prazo, para um trecho da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, com o objetivo

de utilizá-lo em sistemas de alerta antecipado, para informar a população sobre possíveis enchentes em tempo hábil de evacuar a região.

O modelo adotado baseia-se em uma formulação simplificada da física das nuvens e utiliza como dados de entrada medidas de variáveis meteorológicas de superfície. Para implementação foi empregada linguagem de programação computacional C++, e a alimentação foi feita com os arquivos de saída gerados automaticamente pelas estações telemétricas operadas pelo Núcleo Integrado de Bacias Hidrográficas (NIBH) da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Em seguida, para a construção dos hidrogramas, foram simuladas transformações de chuva em vazão através do método do SCS concentrado.

Os resultados obtidos pelos modelos foram satisfatórios, considerando as dificuldades em realizar uma previsão quantitativa de chuva para uma determinada localidade. Os autores conseguiram prever a ocorrência de precipitações, ainda que, algumas vezes, com atraso.

Antonio e Andrade (2007) avaliaram a eficácia da utilização de radar meteorológico no monitoramento e na quantificação da precipitação para a bacia do Córrego do Gregório, em São Carlos, SP. Para tanto foram selecionados três eventos de precipitação severos, para os quais se dispunham de dados pluviométricos em uma estação da área e dados do radar meteorológico da cidade de Bauru, SP, a 175 km de distância de São Carlos, SP.

A realização deste trabalho evidenciou que o monitoramento contínuo por radar das precipitações que se deslocam para a área sujeita a inundação, permite antecipar a ocorrência dos eventos de cheia, com a emissão de alertas antecipados, possibilitando a tomada de precauções e providências de mitigação dos efeitos das inundações.

Garotti et al. (2007) empregaram diferentes metodologias para o cálculo do coeficiente de escoamento superficial (C), verificando a influência das áreas impermeáveis diretamente conectadas, para seis bacias das cidades de São Carlos, SP. Os três métodos de cálculo propostos basearam-se em: características gerais de urbanização (C_{URB}); características detalhadas da superfície (C_{DET}); e áreas impermeáveis diretamente conectadas (C_{AIDC}).

Como o cálculo de C_{URB} baseou-se em características gerais e relativamente vagas de urbanização (como proximidade ao centro, densidade de edificações, presença de espaços abertos, etc.), os autores encontraram dificuldades em enquadrar as áreas analisadas, sugerindo evitar a utilização dessa metodologia. Os outros dois métodos de cálculo de C partem de dados mais realistas e fáceis de quantificar, possibilitando uma maior fidelidade no enquadramento das áreas. O estudo permitiu concluir, portanto, que o uso de C_{AIDC} é recomendado para bacias com altas taxas de impermeabilidade, já que considera a geração de

escoamento imediata em áreas impermeáveis diretamente conectadas, aumentando o volume escoado e se aproximando da realidade. Entretanto, para bacias com grandes áreas permeáveis é sugerida a adoção do C_{DET} .

Souza (2008) avaliou diferentes cenários ambientais de drenagem urbana para as seguintes sub-bacias, pertencentes à área urbana de São Carlos, SP: Santa Maria Madalena, Tijuco Preto, Mineirinho, Gregório e Monjolinho.

O principal objetivo desse trabalho era a construção dos cenários a partir de variáveis hidráulicas e hidrológicas, através de curvas de permanência, para os anos de 2025, 2050, 2075 e 2100. Os cenários foram construídos com base na Avaliação Ecosistêmica do Milênio, que prevê cenários reativos e proativos. Foi proposta também, para cada cenário, uma metodologia de incentivos ambientais baseada no armazenamento potencial de água no lote e na vazão máxima instantânea.

Souza (2008) concluiu que, embora os cenários reativos apresentem menores valores de vazão máxima, os cenários proativos possuem maiores benefícios ambientais, e que a aplicação de incentivos ambientais, tais como estímulos à manutenção e à proteção do meio ambiente (como impostos e taxas, por exemplo), é uma ferramenta de fácil aplicação e rápida obtenção de resultados, podendo servir de grande utilidade aos órgãos públicos.

4 Material e Métodos

4.1 Área de Estudo

A bacia do Córrego do Gregório é uma das principais bacias hidrográficas da cidade de São Carlos, SP, cuja localização é objeto da Figura 4-1. Por encontrar-se em crescente processo de urbanização, a parcela mais de montante da bacia do Córrego do Gregório, representada pela Figura 4-2, foi escolhida como objeto de estudo desse trabalho. Ela está entre as 14 bacias urbanas localizadas nas nascentes do Rio Monjolinho, afluente do Rio Jacaré-Guaçu. A fração da bacia estudada está geograficamente localizada entre as coordenadas UTM, 202000 a 208000 oeste e 7559000 a 7564000 sul. Com 5,8 km de comprimento axial, drena aproximadamente 10,1 km² de área, dos quais 60% correspondem a áreas urbanas e 40% a espaços abertos.

Figura 4-1 – Localização do Município de São Carlos

Fonte: GONÇALVES (2008).

Figura 4-2 - Bacia Hidrográfica do Córrego do Gregório

Fonte: CDCC (2007), modificado.

4.1.1 Pedologia

Segundo Barros (2005) o município de São Carlos, SP, é caracterizado por solos altamente permeáveis e, em sua maioria, é constituído por zonas de latossolo-vermelho-amarelo e de areia quartzosa profunda com característica arenosa. Este é também o tipo de solo predominante na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório (Figura 4-3).

Figura 4-3 - Pedologia da Bacia Hidrográfica do Córrego do Gregório

Fonte: SOUZA (2008), modificado.

4.1.2 Uso e Ocupação do Solo

A área urbanizada da bacia em estudo (60%) é ocupada por residências, comércios, áreas institucionais e verdes. Cabe ressaltar que o fato da bacia hidrográfica possuir 60% de sua área em espaços urbanos, não significa que tenha 60% de área impermeável. A porcentagem de áreas impermeáveis será definida mais adiante. A Figura 4-4 apresenta o uso e ocupação do solo da bacia do Córrego do Gregório.

Figura 4-4 - Uso e Ocupação do Solo

Fonte: RELATÓRIO PÓLIS (2002), modificado.

4.2 Levantamento de Campo

O levantamento de campo, realizado entre os meses de abril e julho de 2008, permitiu a determinação dos comprimentos de galerias pluviais e sarjetas, diâmetros das galerias, localização das bocas de lobo e detalhamento das seções transversais dos cursos d'água naturais, utilizados nesse estudo. A Tabela 4-1 apresenta os diâmetros e comprimentos levantados em campo e a representação da localização da rede de drenagem mapeada dentro da bacia pode ser conferida no Apêndice B.

Durante os meses de novembro de dezembro de 2008 mapeou-se a rede de galerias pluviais da parcela mais de jusante da bacia, não utilizada no presente trabalho, mas que também se encontra disponível para possíveis estudos posteriores.

Tabela 4-1 – Diâmetros e comprimentos levantados em campo

Condutos	Diâmetro (m)	Comprimento (m)
	0,40	2030
Galerias Pluviais	0,60	8930
	0,80	590
	1,00	60
Sarjetas	-	1130
Canais	-	12439
Total (km)		25,179

4.3 Discretização da Bacia

As bacias hidrográficas urbanas possuem enorme diversidade espacial, principalmente em função das interferências resultantes das ações antrópicas. Para tentar representar essa heterogeneidade durante a modelagem, a bacia é dividida em áreas menores e semelhantes entre si.

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram determinados onze diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica, denominados “*configurações*”, estabelecidos com base em dois fatores: a infra-estrutura de drenagem existente e as áreas de contribuição de seus condutos.

Através de intensivo levantamento de campo, a rede de drenagem existente foi mapeada e representada de forma mais detalhada pela Configuração 1. A partir dessa configuração, foram determinadas áreas mínimas de contribuição, representativas das sub-bacias, para construção das demais configurações do sistema de drenagem. Assim, apenas os condutos cujas áreas de contribuição fossem maiores ou iguais às áreas mínimas adotadas foram considerados na modelagem. Essa metodologia vem sendo testada, já tendo sido utilizada em trabalhos anteriores (Kalin et al., 2003; Moussa, 2008).

Na Tabela 4-2 estão descritas as principais características das configurações utilizadas: os valores de área mínima em hectares empregados neste estudo, a quantidade de sub-bacias para cada configuração, as respectivas densidades de drenagem (DD), que consistem na relação entre o valor do comprimento total da rede de drenagem e sua área correspondente (Equação 4-1) e a porcentagem média de áreas impermeáveis.

Tabela 4-2 – Configurações da rede de drenagem

Configuração	A _{mínima} (ha)	Sub-Bacias	DD (1/km)	AI _{médio} * (%)
1	Rede Completa	298	2,49	32,20
2	1	240	2,25	32,14
3	5	138	1,61	32,15
4	10	89	1,30	32,30
5	Canais Naturais	52	1,23	32,26
6	20	52	0,84	32,13
7	50	26	0,57	32,00
8	100	14	0,32	32,27
9	200	6	0,32	32,86
10	300	3	0,12	32,62
11	1000	1	0,00	32,00

* Porcentagem de áreas impermeáveis médias por sub-bacia

$$DD = \frac{\sum_{i=1}^j L_i}{A} \quad (4-1)$$

Em que:

DD = densidade de drenagem (1/km);

L_i = comprimento do conduto i, considerando micro e macro-drenagem (km);

A = área total da bacia (km²);

j = quantidade de condutos existentes na rede de drenagem.

Nota-se que, além dos níveis de discretização definidos pelas áreas mínimas, foi considerada também a bacia hidrográfica com todos canais naturais (Configuração 5), desprezando a rede de galerias pluviais e sarjetas, permitindo análise da importância destas para a modelagem da transformação chuva-vazão.

Na Figura 4-5 podem ser visualizadas algumas configurações adotadas, bem como as correspondentes densidades de drenagem e quantidades de condutos, para efeito de comparação.

Figura 4-5 – Esquema gráfico das Configurações 1, 3, 5 e 7

Para as diferentes configurações do sistema, assim definidas, foram determinados os parâmetros relacionados aos processos físicos e hidrológicos, conforme descrito nos itens a seguir, para posterior calibração e validação, visando à comparação dos desempenhos em termos da reprodução dos hidrogramas resultantes na seção de saída da bacia.

4.4 Representação das Características da Bacia

O modelo hidrológico SWMM, utilizado para as avaliações desse trabalho, representa o sistema de drenagem através de bacias, condutos e nós. Os subitens a seguir discorrem sobre a determinação dos parâmetros necessários à simulação, muitos dos quais foram posteriormente calibrados, sendo, portanto, alguns valores aqui descritos adotados como estimativas iniciais. Cabe ressaltar que os parâmetros foram obtidos da mesma maneira para todas as configurações.

Alguns dados, definidos a seguir, foram obtidos através de planta planialtimétrica com escala 1:10000, referente ao ano 2004, fornecida pelo Centro de Divulgação Científica e Cultural (CDCC – USP) de São Carlos, com o uso do software AutoCAD.

Foi também realizado um intensivo levantamento de campo que visou à obtenção de características físicas dos condutos, tais como: comprimentos de galerias pluviais e sarjetas, diâmetros das galerias, e detalhamento das seções transversais dos cursos d'água naturais, e dos nós: localização das bocas de lobo e alturas máximas de escoamento. As visitas a campo ocorreram entre os meses de abril e julho de 2008.

4.4.1 Sub-Bacias

As sub-bacias são caracterizadas pelos parâmetros apresentados na Tabela 4-3, abaixo. Os métodos utilizados para determinação destes estão descritos a seguir.

Tabela 4-3 – Parâmetros das Sub-bacias

Parâmetro	Sigla	Unidade
Área	A	ha
Largura	W	m
Declividade	S	%
Áreas Impermeáveis	AI	%
Coeficiente de rugosidade de Manning - Superfícies impermeáveis	NI	-
Coeficiente de rugosidade de Manning - Superfícies permeáveis	NP	-
Capacidade de armazenamento em depressões - Superfícies impermeáveis	DI	mm
Capacidade de armazenamento em depressões - Superfícies permeáveis	DP	mm
Áreas impermeáveis não conectadas	AINC	%

As áreas e os perímetros das sub-bacias foram determinados com o suporte da planta planialtimétrica.

O manual do modelo SWMM (ROSSMAN, 2007) sugere que as larguras das sub-bacias sejam calibradas, e as define, como estimativa inicial, como uma relação entre a área e o valor médio dos comprimentos máximos de escoamento superficial. Dessa forma, optou-se por representar esse parâmetro de acordo com a Figura 4-6, na qual “W” representa a largura das sub-bacias e “Le” a largura do retângulo equivalente.

Figura 4-6 – Representação das larguras das sub-bacias

Os valores de Le foram calculados pelo método do retângulo equivalente (equações 4-2 e 4-3), que, por utilizar somente características físicas das sub-bacias, é de fácil determinação (GARCIA, 2005):

$$Le = \frac{k_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{k_c} \right)^2} \right] \quad (4-2)$$

$$k_c = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (4-3)$$

Na qual:

Le = largura do retângulo equivalente (m);

A = área da bacia hidrográfica ou sub-bacia (m^2);

k_c = coeficiente de compacidade (adimensional), definido como a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual a da bacia;

P = perímetro da bacia hidrográfica ou sub-bacia (m).

A partir desses valores, foram calculadas as larguras das sub-bacias (Equação 4-4):

$$W = \frac{A}{Le} \quad (4-4)$$

Em que:

W = largura das sub-bacias (m).

As declividades médias (S) foram calculadas através de planta planialtimétrica pelo método das quadriculas associadas a um vetor, conforme descrição de Villela e Mattos (1975).

Para quantificar as áreas impermeáveis das sub-bacias (AI) foi utilizado Google Earth, programa desenvolvido e distribuído pelo Google, construído a partir de imagens de satélite. A consulta às imagens ocorreu em Julho de 2008, porém para São Carlos a referência é ao ano de 2004. A área dos pavimentos foi calculada multiplicando o comprimento das ruas (medidos através da planta planialtimétrica) pela largura média de rua, 13 metros, valor adotado para toda a bacia, também utilizado por Barbassa (1991).

Os coeficientes de rugosidade de Manning para as superfícies permeáveis e impermeáveis (NP e NI), e as respectivas capacidades de armazenamento (DP e DI), foram obtidos através do processo de calibração (descrito no item 4.6.2), a partir dos intervalos de valores sugeridos no Manual do Usuário do SWMM5 (Rossman, 2007) e apresentados na Tabela 4-4.

Tabela 4-4- Intervalo de parâmetros do SWMM para rugosidade e armazenamento

Sigla	Parâmetro	Mínimo	Máximo
NI	Coeficiente de rugosidade de Manning - Superfícies impermeáveis	0,010	0,040
NP	Coeficiente de rugosidade de Manning - Superfícies permeáveis	0,100	0,800
DI (mm)	Capacidade de armazenamento em depressões - Superfícies impermeáveis	1,27	2,57
DP (mm)	Capacidade de armazenamento em depressões - Superfícies permeáveis	2,54	7,62

As áreas impermeáveis diretamente conectadas (AIDC) e não conectadas (AINC) são parâmetros cuja importância vem sendo analisada e comprovada por diversos estudos (LEE & HEANEY, 2003; GAROTTI ET AL., 2007). Segundo Garotti et al. (2007), a área impermeável diretamente conectada ao sistema de drenagem é a fração da área impermeável que contribui efetivamente para o escoamento superficial direto, sem passar por superfícies permeáveis ou ter a possibilidade de infiltrar-se no solo. Portanto, a área não conectada é a diferença entre a área impermeável total e a área diretamente conectada.

Para este trabalho foi adotado um valor médio de AINC igual a 10%, obtido a partir dos valores apresentados em Garotti et al. (2007), para a cidade de São Carlos – SP, em conformidade com a Tabela 4-5.

Tabela 4-5 – Valores de AIDC e AINC para São Carlos

Ocupação das Áreas	AIDC (%)	AINC (%)	AP (%)
Industrial / Comercial	96,5	2,3	1,2
Outros / Misto	84,9	7,8	7,2
Residencial $\leq 125\text{m}^2$	94,3	0,2	5,5
Residencial $\leq 200\text{m}^2$	72,6	14,7	12,7
Residencial $\leq 300\text{m}^2$	87,7	6,2	6,1
Residencial $\leq 400\text{m}^2$	81,8	10,5	7,6
Residencial $\leq 600\text{m}^2$	74,3	15,0	10,6
Residencial $\leq 1200\text{m}^2$	60,8	30,8	8,5
Residencial $> 1200\text{m}^2$	72,5	20,3	7,1
Vagos	0,0	0,0	100,0
Ruas	100,0	0,0	0,0
Média aritmética	-	10	-

Fonte: GAROTTI ET AL. (2007).

Infiltração

O modelo hidrológico SWMM oferece três diferentes possibilidades para modelagem da infiltração da água no solo: Equações de *Horton*, Método de *Green-Ampt*, e Método SCS. A literatura mostra a preferência dos especialistas pelas equações de *Horton*, motivo pelo qual se optou por sua utilização no presente trabalho. Os parâmetros necessários para a simulação da infiltração podem ser visualizados na Tabela 4-6.

Assim como os coeficientes de rugosidade e capacidades de armazenamento das superfícies das sub-bacias, os parâmetros de infiltração também foram calibrados a partir das faixas de valores, sugeridas para tais parâmetros no Manual do Usuário do SWMM5 (ROSSMAN, 2007), conforme indicação da Tabela 4-6, exceto o valor mínimo da capacidade de infiltração final, que foi retirado de Silva (2003).

Tabela 4-6 – Intervalos de parâmetros do SWMM para infiltração

Sigla	Parâmetro	Mínimo	Máximo
I0 (mm/h)	Capacidade de infiltração inicial	8	254
Ib (mm/h)	Capacidade de infiltração final	2,5*	120
k (1/h)	Constante de decaimento	2	7

* SILVA (2003)

4.4.2 Condutos

Os condutos são os dispositivos através dos quais a água é propagada dentro do sistema de drenagem: galerias pluviais, sarjetas e canais naturais. Os parâmetros necessários à sua caracterização, para o SWMM, estão descritos na Tabela 4-7.

Tabela 4-7 – Parâmetros dos Condutos

Parâmetro	Sigla	Unidade
Comprimento	L	m
Declividade	Sc	m/m
Rugosidade	Ncn / Ng,s	-
Seção transversal	-	-
Vazão de base	Q _b	m ³ /s
Offset de saída	h _{off}	m

Canais Naturais

As seções transversais dos canais naturais foram medidas com o auxílio dos técnicos do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), no dia 27/05/2008. O Córrego do Gregório teve quatro seções distintas detalhadas em campo, a quinta seção utilizada foi retirada do trabalho de Lima et al. (2007). Os córregos secundários, Invernada e Lazarini, tiveram dois pontos ao longo de seus percursos medidos. A partir dessas seções, por interpolação, foi possível obter as seções transversais médias para cada trecho dos canais naturais. Os detalhes sobre a localização das seções medidas podem ser vistos na Tabela 4-8 e na Figura 4-7, a seguir.

As seções transversais resultantes da interpolação das seções avaliadas em campo para o Córrego do Gregório e seus afluentes estão ilustradas no Apêndice C.

Os comprimentos dos trechos dos canais foram medidos a partir da planta planialtimétrica. Os coeficientes de rugosidade de Manning dos canais naturais (N), apresentados na Tabela 4-9, foram retirados do trabalho de Silva (2003), adaptados de Barbassa (1991).

Tabela 4-8 - Localização das seções transversais medidas em campo

Córrego	Seção	Posição		Observação
		Latitude (S)	Longitude (W)	
Gregório	SG1	7560523	206668	Nascente
	SG2	7560761	204713	Rod. Washington Luiz
	SG3	7561413	203585	Rotatória Celeste Zanon
	SG4	7561521	203210	Rua José Barnabé
	SG5	7562045	202217	Rua Campos Salles
Invernada	SI1	7562225	204920	Rod. Washington Luiz
	SI2	7561495	203576	Rotatória Celeste Zanon
Lazarini	SL1	7562139	203059	Rua Geminiano Costa
	SL2	7561746	202780	Rua Florentino Kanabley

Figura 4-7 – Localização das seções transversais medidas em campo

Tabela 4-9 - Coeficientes de rugosidade de Manning para os canais naturais

Características dos Canais	Ncn
Canal em terra, sinuoso, com gramíneas e pedras	0,045
Canal em terra, sinuoso, com vegetação de médio porte	0,050
Canal em terra, com vegetação natural densa	0,080
Canal em terra, sinuoso, com vegetação natural densa e áreas de amortecimento	0,100

Na Figura 4-8 encontram-se os trechos dos canais cujas características estão detalhadas na Tabela 4-10. As declividades foram calculadas através das médias ponderadas dos valores definidos em Barbassa (1991).

Figura 4-8 – Trechos dos canais por rugosidade

Tabela 4-10 – Características dos canais naturais por trecho

Córrego do Gregório				Afluentes 1 e 2			
Trecho	L (m)	Sc (m/m)	Ncn -	Trecho	L (m)	Sc (m/m)	Ncn -
CP1	165	0,023	0,100	CS1	290	0,057	0,100
CP2	1410	0,027	0,100	CS2	1560	0,020	0,100
CP3	2025	0,012	0,050	CT1	400	0,058	0,100
CP4	826	0,007	0,045				
CP5	425	0,025	0,045				
Sc _{médio}		0,019		Sc _{médio}		0,045	
Córrego do Invernada				Córrego do Lazarini			
Trecho	L (m)	Sc (m/m)	Ncn -	Trecho	L (m)	Sc (m/m)	Ncn -
CS3	2310	0,038	0,080	CS4	1978	0,032	0,045
				CT2	270	0,061	0,045
				CT3	600	0,064	0,045
				CT4	180	0,066	0,045
Sc _{médio}		0,038		Sc _{médio}		0,056	

A forma de determinação da vazão de base será descrita no item 4.5.3. O offset de saída, que será descrito mais adiante, representa a diferença de cotas entre o fundo do conduto e nó de jusante, para os canais naturais foi considerada zero.

Galerias Pluviais e Sarjetas

As galerias pluviais foram consideradas circulares com diâmetros verificados em campo na interseção com os canais naturais e mantidos constantes ao longo da rede. Os comprimentos foram medidos em planta e o recobrimento (diferença de altura entre a cota da rua e a geratriz superior da galeria) adotado foi de 1,00 m, valor mínimo exigido para redes de galerias pluviais, segundo Bidone e Tucci (1995). De posse desses dados foi possível calcular o offset de saída na interseção das galerias com os canais, através da Equação 4-5, representada graficamente pela Figura 4-9.

$$h_{off} = h_{max} - 1,00 - \phi \quad (4-5)$$

Em que:

h_{off} = Offset de saída (m);

h_{max} = Profundidade máxima (m), definida pela diferença entre a cota da rua e a cota do fundo do nó;

ϕ = Diâmetro da galeria (m).

Figura 4-9 – Esquema gráfico do offset de saída

A geometria e os elementos necessários para a representação das sarjetas são apresentados na Figura 4-10. Para a bacia hidrográfica em estudo, foram considerados os seguintes valores: altura (y) de 0,15 metros e inclinação transversal (i) igual a 3%.

Figura 4-10 – Representação geométrica das sarjetas

As declividades das galerias pluviais e sarjetas foram consideradas iguais às declividades das ruas, obtidas pelo método da quadrícula associadas a um vetor. O valor adotado para a rugosidade foi de 0,013 (BARBASSA, 1991).

4.4.3 Nós

Os nós são as junções que ligam os condutos e que recebem a contribuição das sub-bacias, fisicamente são representados pelo encontro de condutos e bocas de lobo. Os parâmetros de entrada dos nós estão descritos na Tabela 4-11.

Tabela 4-11 – Parâmetros dos nós

Parâmetro	Sigla	Unidade
Coordenadas	x,y	-
Cota de fundo	Z	m
Altura máxima	$h_{\text{máx}}$	m
Vazão de base	Q_b	m^3/s
Altura inicial de escoamento	h_{inicial}	m

As coordenadas e as cotas do fundo de cada nó foram obtidas através de planta planialtimétrica, depois de serem devidamente mapeados em visitas a campo. Foram considerados “nós” todos os encontros entre condutos (canais naturais, galerias pluviais e sarjetas), pontos iniciais de condutos e pontos intermediários de galerias com comprimento acima de 100 metros.

As profundidades máximas dos nós - definidas pela diferença entre as cotas das ruas e dos fundos dos nós - tanto dos canais naturais, quanto das galerias e sarjetas foram determinadas a partir da planta planialtimétrica e das seções transversais, medidas em campo. A obtenção das vazões e alturas iniciais de escoamento está descrita no item 4.5.3.

4.5 Dados Hidrológicos

Os dados de precipitação e nível utilizados foram obtidos do monitoramento realizado entre janeiro de 2004 e dezembro de 2006 pelo NIBH - Núcleo Integrado de Bacias Hidrográficas da Escola de Engenharia de São Carlos, USP, e pelo SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos.

A seção escolhida como exutório da rede de drenagem do presente trabalho (posto de calibração 1, PC1 – $A_{\text{dren}} = 10,1 \text{ km}^2$), para análise dos hidrogramas de saída, localiza-se em frente ao Fórum de São Carlos, na Av. Comendador Alfredo Maffei, onde se situava, na época, a Estação Fórum – Posto pluvio-fluviométrico da bacia do Córrego do Gregório, monitorada pelo NIBH (Figura 4-11). Para avaliar a confiabilidade dos dados registrados pela Estação Fórum, estes foram comparados aos registros do Posto hidrométrico monitorado pelo SAAE, PC2 – $A_{\text{dren}} = 18,9 \text{ km}^2$ (Figura 4-12), situado no encontro do Córrego do Gregório com o Córrego do Monjolinho, próximo ao Shopping Iguatemi. A localização dos dois postos pode ser visualizada na Figura 4-13.

Figura 4-11 – Posto pluvio-fluviométrico – Estação Fórum (Foto: 01/11/2007)

Fonte: SOUZA (2008).

Figura 4-12 - Posto hidrométrico monitorado pelo SAAE (Foto: 01/11/2007)

Fonte: SOUZA (2008).

Figura 4-13 – Localização dos postos de monitoramento hidrológico

4.5.1 Eventos de Precipitação

A escolha dos eventos a serem utilizados na modelagem exigiu um estudo da compatibilidade dos dados provenientes das duas seções de monitoramento. Foram analisados 57 eventos ocorridos entre fevereiro de 2004 e dezembro de 2006 com precipitação total mínima de 10 mm (Tabela A - 1, Apêndice A). Dos 57 eventos, oito registraram falhas na medição do Posto hidrométrico monitorado pelo SAAE, e vinte apresentaram inconsistência entre os dois postos de medição, resultando em um total de aproximadamente 49% de registros de eventos não recomendáveis à aplicação neste estudo.

Os eventos selecionados para as diversas etapas da modelagem (análise de sensibilidade e processos de calibração e validação) estão descritos na Tabela 4-12, em função dos seguintes fatores:

- Precipitação total (P_{total}), dada em mm;
- Duração do evento, em minutos;
- Precipitação total máxima: lâmina acumulada máxima em 1 minuto e 5 minutos, em mm;
- Intensidade média ($I_{média}$): razão entre a precipitação total e a duração da chuva, dada em mm/h;
- Tempo de retorno (anos), determinado com base na equação de chuvas intensas da cidade de São Carlos apresentada por Righetto (1995) e ilustrada pela Equação 4-6;
- Índice de precipitação acumulada (IPA): precipitação acumulada dos cinco dias anteriores ao evento, em mm.

Tabela 4-12 – Caracterização dos eventos

Evento	Data	Duração (min)	P_{total} (mm)	$I_{média}$ (mm/h)	Tr (anos)	IPA (mm)
2	6/2/2004	150	31,7	12,7	1,00	11,2
7	22/2/2004	663	29,3	2,7	0,34	6,3
12	23/5/2004	47	30,5	38,9	2,43	13,6
24	26/2/2005	69	13,3	11,6	0,05	5,3
27	16/3/2005	342	58,0	10,2	8,06	40,5
49	15/2/2006	206	41,2	12,0	2,44	85,2
52	21/3/2006	256	50,3	11,8	5,06	7,5
53	23/3/2006	170	15,8	5,6	0,05	55,0

$$I_{média} = \frac{1519 * Tr^{0,236}}{(16 + d)^{0,935}} \quad (4-6)$$

Em que:

$I_{média}$ = intensidade (mm/h);

Tr = período de retorno (anos);

d = duração (min).

4.5.2 Hidrogramas Observados

Os hidrogramas observados na seção do Fórum, representados pelas Figuras 4-14 a 4-21, foram construídos através da equação da curva chave, expressa por Lima et al. (2007) como (Equação 4-7):

$$Q_{obs} = 8,278 \cdot h^{2,2517} \quad (R^2 = 0,99) \quad (4-7)$$

Em que:

Q_{obs} = vazão no exutório (m³/s);

h = nível (m).

Figura 4-14 – Precipitação e hidrograma observados do evento 2, utilizado na fase de validação

Figura 4-15 – Precipitação e hidrograma observados do evento 7, utilizado na fase de validação

Figura 4-16 – Precipitação e hidrograma observados do evento 12, utilizado nas fases de análise de sensibilidade e calibração

Figura 4-17 – Precipitação e hidrograma observados do evento 24, utilizado na fase de calibração

Figura 4-18 – Precipitação e hidrograma observados do evento 27, utilizado na fase de análise de sensibilidade

Figura 4-19 – Precipitação e hidrograma observados do evento 49, utilizado na fase de validação

Figura 4-20 – Precipitação e hidrograma observados do evento 52, utilizado nas fases de análise de sensibilidade e calibração

Figura 4-21 – Precipitação e hidrograma observados do evento 53, utilizado na fase validação

4.5.3 Escoamento de Base

As vazões de base, parâmetros de entrada dos nós de dos canais naturais, foram calculadas a partir de um valor de nível inicial obtido pela Estação Fórum no momento de iminência da chuva. Obteve-se a vazão no exutório através da equação da curva chave, definida por Lima et al. (2007) e descrita pela Equação 4-6.

Com este valor pôde-se calcular a vazão específica (q) da bacia total, pela Equação 4-8:

$$q = \frac{Q_{obs}}{A} \quad (4-8)$$

Em que:

q = vazão específica da bacia hidrográfica ($m^3/s/m^2$);

Q_{obs} = vazão no exutório (m^3/s);

A = área total da bacia hidrográfica.

De posse desses valores foram calculadas as vazões de base para os trechos de canal e para os nós, multiplicando a vazão específica da bacia pela área de contribuição referente ao ponto médio de cada trecho e ao nó, respectivamente (Equação 4-9).

$$Q_b = q * At \quad (4-9)$$

Na qual:

Q_b = vazão de base no trecho de canal ou no nó (m^3/s);

q = vazão específica da bacia hidrográfica ($m^3/s/m^2$);

At = Área de contribuição referente ao ponto médio do trecho ou ao nó (m^2).

A altura inicial de escoamento nos nós também é uma variável de entrada do SWMM. Para a obtenção desses valores foi necessário quantificar uma relação entre as propriedades geométricas das seções transversais dos canais naturais. Com o auxílio do software AutoCAD® foi possível supor diversas alturas e calcular suas respectivas áreas e perímetros molhados, obtendo uma relação $A(R_h)^{2/3} \times h_{inicial}$. A Figura 4-22 apresenta essa relação, referente ao nó JP1 da rede de drenagem (Configuração 1).

Figura 4-22 – Relação $A(R_h)^{2/3} \times H$ para o nó JP1

O programa Microsoft Office Excel permitiu a obtenção das equações de segundo grau que melhor representassem tais curvas. Com os valores de Q obtidos para as vazões de base e combinando a equação de Manning (Equação 4-10) com a equação da curva ($A(R_h)^{2/3} \times h_{\text{inicial}}$), puderam-se obter os valores iniciais de profundidade.

$$A_{ST} * R_h^{2/3} = \frac{Q_b * Ncn}{\sqrt{Sc}} \quad (4-10)$$

Em que:

A_{ST} = área da seção transversal (m^2);

R_h = raio hidráulico da seção transversal (m);

Q_b = vazão de base (m^3/s);

Ncn = coeficiente de rugosidade de Manning;

Sc = declividade (m/m).

As vazões de base de cada evento obtidas para os condutos e os nós podem ser visualizadas no Apêndice D, assim como as alturas iniciais de escoamento de cada nó.

4.6 Aplicação do SWMM

O modelo hidrológico Storm Water Management Model foi aplicado à bacia em estudo para análise de sensibilidade, calibração e validação de todos os níveis de detalhamento, o fluxograma da Figura 4-23 apresenta uma representação simplificada dessas etapas, na ordem em que foram realizadas. Os equacionamentos utilizados pelo modelo para simulação do escoamento superficial e propagação estão descritos no Anexo A.

Figura 4-23 – Fluxograma explicativo da aplicação do SWMM

**Representação hidráulico-hidrológica do sistema de drenagem pelo SWMM
(JAMES ET AL., 2008).**

O modelo SWMM realiza as simulações de geração de escoamento e propagação em redes de drenagem através de dois módulos computacionais: *Runoff* e *Extran*, respectivamente.

O módulo *Runoff*, responsável pela geração do escoamento superficial, atua sobre as sub-bacias, admitindo que elas se comportem como reservatórios não lineares (Figura 4-24), definidos a partir da combinação da equação de Manning com a equação da continuidade (Equações 4-11 e 4-12).

Figura 4-24– Representação do reservatório não linear

$$Q = W \frac{1}{N(I,P)} [D - D(I,P)]^{5/3} S^{1/2} \quad (4-11)$$

Na qual:

Q_{sup} = vazão (m^3/s);

W = largura da sub-bacia (m);

$N(I,P)$ = coeficiente de rugosidade de Manning para I (superfícies impermeáveis) e P (superfícies permeáveis);

D = altura de água (m);

$D(I,P)$ = profundidade do armazenamento em depressão para I (superfícies impermeáveis) e P (superfícies permeáveis) (m);

S = declividade da sub-bacia (m/m).

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dD}{dt} = A \cdot i^* - Q \quad (4-12)$$

Em que:

$V = A \cdot d$ = Volume de água sobre a subárea (m^3);

t = tempo (s),

A = área da sub-bacia (m^2);

i^* = chuva efetiva (m/s);

As vazões obtidas para as sub-bacias, referentes ao escoamento superficial, são inseridas como contribuição aos nós, estabelecendo a ligação entre os dois módulos computacionais supracitados. O módulo *Extran* utiliza a equação da continuidade nos nós (Equação 4-13) e, para os condutos (canais, galerias e sarjetas), adota a equação do momento (Equação 4-14), conservando a continuidade nos nós e o momento nos condutos. A equação da continuidade para escoamentos não-permanentes com área e vazão como variáveis dependentes é:

$$\frac{\partial A_{ST}}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial L} = 0 \quad (4-13)$$

Em que:

A_{ST} = área da seção transversal (m^2);

Q = vazão (m^3/s);

L = comprimento do conduto (m);

t = tempo (s).

A equação do momento pode ser escrita de diversas formas, dependendo das variáveis dependentes. Utilizando a vazão (Q) e a cota piezométrica (H), cota do fundo acrescida da profundidade de água, a equação de momento fica da seguinte forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2 / A_{ST})}{\partial L} + g A_{ST} \frac{\partial H}{\partial L} + g A_{ST} S_f = 0 \quad (4-14)$$

Na qual:

g = aceleração da gravidade;

$H = z + h$ = cota piezométrica;

Z = altitude do fundo do canal/conduto;

h = profundidade de água;

S_f = declividade da linha de energia.

(A declividade do fundo está incorporada pelo H).

Os procedimentos de cálculo completos, utilizados pelo SWMM podem ser visualizados no Anexo A desse trabalho.

4.6.1 Análise de Sensibilidade

Para melhor entendimento dos parâmetros utilizados pelo modelo, realizou-se uma análise de sensibilidade, verificando a influência exercida por eles sobre o hidrograma de saída. Para verificar a influência dos parâmetros em diferentes discretizações a análise de sensibilidade foi efetuada para as configurações 1, 4 e 8.

Os eventos 12, 27 e 52 da Tabela 4-12 foram selecionados para análise de sensibilidade, pelo fato de que eventos de diferentes intensidades devem permitir a análise do comportamento dos parâmetros submetidos a diferentes condições de precipitação.

A análise de sensibilidade foi realizada com o suporte do software de simulação PCSWMM.NET (James et al., 2008).

Os parâmetros analisados estão detalhados na Tabela 4-13. Para os valores iniciais das larguras e declividades das sub-bacias foram utilizados os valores encontrados pela metodologia já descrita em 4.3.1, enquanto que, para a porcentagem de áreas impermeáveis, foi adotado 50% para todas as sub-bacias. As faixas de variação dos valores para os parâmetros de rugosidade (superfícies e condutos), armazenamento e infiltração foram retiradas do Manual de Usuário do SWMM (ROSSMAN, 2007), e os valores médios dos intervalos foram utilizados como valores iniciais. Exceto para o valor mínimo da capacidade de infiltração inicial, que foi retirado do trabalho de Silva (2003).

Tabela 4-13 – Parâmetros avaliados na análise de sensibilidade

	Parâmetro	Sigla	Unidade	Mínimo	Máximo	Valor inicial
Sub-Bacias	Largura	W	m	-	-	W
	Declividade	S	%	-	-	S
	Áreas impermeáveis	AI	%	0	100	50
	Coefficiente de rugosidade de Manning - Superfícies impermeáveis	NI	-	0,011	0,024	0,018
	Coefficiente de rugosidade de Manning - Superfícies permeáveis	NP	-	0,130	0,800	0,465
	Capacidade de armazenamento em depressões - Superfícies impermeáveis	DI	mm	1,27	2,54	1,905
	Capacidade de armazenamento em depressões - Superfícies permeáveis	DP	mm	2,54	7,62	5,08
Infiltração	Capacidade de infiltração inicial	I0	mm/h	8	254	131
	Capacidade de infiltração final	Ib	mm/h	2,5	120	61,25
	Constante de decaimento	k	1/h	2	7	4,5
Condutos	Rugosidade dos canais naturais	Ncn	-	0,030	0,100	0,065
	Rugosidade das galerias e sarjetas	Ng,s	-	0,011	0,017	0,014

Fonte: ROSSMAN (2007), adaptado.

A análise de sensibilidade foi efetuada variando-se um parâmetro por vez, de -90 a +90%, enquanto os demais tiveram seus valores iniciais mantidos constantes. Para interpretar a influência de cada parâmetro foram considerados os seguintes critérios: vazão de pico, tempo de pico e volume total escoado conforme as equações 4-15 a 4-17, descritas a seguir.

$$EQp = 100 * \frac{(Qp_j - Qp_{REF})}{Qp_{REF}} \quad (4-15)$$

Em que:

EQp = desvio de vazão de pico (%);

Qp_j = vazão de pico calculada variando os parâmetros, para -90 < j < +90% (m³/s);

Qp_{REF} = vazão de pico de referência, calculada para valores iniciais dos parâmetros (m³/s).

$$ETp = 100 * \frac{(Tp_j - Tp_{REF})}{Tp_{REF}} \quad (4-16)$$

Em que:

ETp = desvio de tempo de pico (%);

Tp_j = tempo de pico calculado variando os parâmetros, para -90 < j < +90% (min);

Tp_{REF} = tempo de pico de referência, calculado para valores iniciais dos parâmetros (min).

$$EVe = 100 * \frac{(EVe_j - EVe_{REF})}{EVe_{REF}} \quad (4-17)$$

Em que:

EVe = desvio de volume total escoado (%);

EVe_j = volume total escoado calculado variando os parâmetros, para -90 < j < +90% (m³);

EVe_{REF} = volume total escoado de referência, calculado para valores iniciais dos parâmetros (m³).

Os índices “REF” referem-se aos valores iniciais base, calculados com as estimativas iniciais das variáveis, antes de se fazer qualquer alteração. Foram utilizados como valores de referência para a análise quantitativa da sensibilidade.

4.6.2 Calibração do SWMM

Após análise de sensibilidade, iniciou-se o processo de calibração dos parâmetros do modelo. A calibração foi realizada em duas etapas descritas a seguir. Os eventos utilizados em ambas as etapas foram os eventos 12, 24 e 52 apresentados na Tabela 4-12.

Optou-se por uma função objetivo para avaliar o melhor ajuste dos hidrogramas: o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe - COE (Nash e Sutcliffe, 1970) expresso pela equação 4-18.

$$\text{Máx } COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_t} (Qobs_i - Qc_i)^2}{\sum_{i=1}^{N_t} (Qobs_i - \overline{Qo})^2} \quad (4-18)$$

Em que:

Q_{obs_i} = vazão observada no final do intervalo de tempo i (m^3/s);

Q_{c_i} = vazão calculada no final do intervalo de tempo i (m^3/s);

$\overline{Q_o}$ = média das vazões observadas (m^3/s);

N_t = número de intervalos de tempo do evento analisado.

4.6.2.1 Calibração dos Parâmetros Não Variáveis Espacialmente

A primeira etapa do processo de calibração buscou avaliar os parâmetros considerados nesse estudo não variáveis espacialmente para toda a bacia do Córrego do Gregório. Dessa forma, somente a Configuração 1, com o sistema de drenagem completo, foi calibrada e seus resultados estendidos às demais configurações. Como se optou por utilizar um algoritmo de otimização para calibração dos parâmetros, foram adotados os intervalos para os valores dos parâmetros sugeridos pelo Manual do Usuário do SWMM (ROSSMAN, 2007), conforme indicação da Tabela 4-14.

Tabela 4-14 – Intervalos dos parâmetros não variáveis espacialmente

Sigla	Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo
NI	Coeficiente de rugosidade de Manning - Superfícies impermeáveis	-	0,010	0,040
NP	Coeficiente de rugosidade de Manning - Superfícies permeáveis	-	0,100	0,800
DI	Capacidade de armazenamento em depressões - Superfícies impermeáveis	mm	1,27	2,57
DP	Capacidade de armazenamento em depressões - Superfícies permeáveis	mm	2,54	7,62
I0	Capacidade de infiltração inicial	mm/h	8	254
Ib	Capacidade de infiltração final	mm/h	2,5	120
k	Constante de decaimento	1/h	2	7

Fonte: ROSSMAN (2007), adaptado.

Algoritmo de otimização empregado na calibração

Dentre os algoritmos de otimização mais utilizados na calibração de modelos hidrológicos encontram-se os algoritmos genéticos, que vêm apresentando resultados satisfatórios (WANG, 1991; LIONG ET AL., 1995; BALASCIO ET AL., 1998), razão pela

qual foi escolhido como ferramenta para este estudo. O algoritmo de otimização foi implementado através de macros especialmente construídas no programa Microsoft Office Excel.

Para iniciar a otimização com o algoritmo genético foi necessário criar uma população inicial. O tamanho da população depende do problema e de sua formulação. Para esse estudo, foi definida uma população com 10 conjuntos de soluções, cada qual constituída de 7 parâmetros. As soluções que compõe a população inicial foram produzidas aleatoriamente, dentro dos intervalos de possíveis valores para cada parâmetro, pelo acionamento da macro “População Inicial” (Figura 4-25). As variáveis x1 a x7 representam os parâmetros, conforme a Tabela 4-15.

POPULAÇÃO INICIAL							
solução	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
1	0,033	0,666	1,850	5,751	123,218	1,248	2,658
2	0,027	0,590	1,294	6,594	217,936	60,327	5,233
3	0,023	0,215	2,038	3,313	39,038	37,061	2,512
4	0,026	0,288	1,400	4,979	233,394	68,130	4,560
5	0,022	0,236	1,925	5,000	60,776	24,058	6,820
6	0,020	0,598	2,520	3,616	21,476	20,692	3,780
7	0,028	0,622	1,458	2,842	168,745	128,406	3,111
8	0,018	0,284	2,277	6,983	222,649	46,982	4,965
9	0,022	0,430	2,436	4,346	133,256	106,214	3,066
10	0,014	0,613	1,790	5,511	11,194	8,263	3,142

Figura 4-25 – Interface do Algoritmo – Macro: População Inicial

Tabela 4-15– Parâmetros da População Inicial

x1	NI	Coefficiente de rugosidade de Manning - superfícies impermeáveis
x2	NP	Coefficiente de rugosidade de Manning - superfícies permeáveis
x3	DI	Armazenamento em depressões - superfícies impermeáveis
x4	DP	Armazenamento em depressões - superfícies permeáveis
x5	I0	Capacidade de infiltração inicial
x6	Ib	Capacidade de infiltração final
x7	k	Constante de decaimento

Em seguida, cada solução é avaliada separadamente através do coeficiente de eficiência de Nash e Suttcliffe (COE), representado pela maximização da Equação 4-18. Essa foi a etapa mais trabalhosa da calibração manual, pois exigiu que os valores dos parâmetros fossem modificados um a um, no arquivo de entrada (.inp) do SWMM para avaliação da função objetivo ($F = COE$).

Efetua-se, então, a seleção das soluções “pais” que darão origem a novas soluções (“filhas”). O torneio de duplas foi o método adotado como operador de seleção, sendo as duplas sorteadas de forma aleatória, através da macro “Duplas para Torneio” (Figura 4-26). Assim, duas a duas, as soluções foram confrontadas, selecionando-se sempre aquela com maior valor da função de aptidão. O elitismo de 10% garantiu que a melhor solução (com o maior valor de F) nunca fosse perdida de uma geração para outra.

solução	F	solução	duplas				maior	solução
1	0,849	1	2	10	0,643	0,612	0,643	2
2	0,643	2	5	1	0,556	0,849	0,849	1
3	0,754	3	8	8	0,553	0,553	0,553	8
4	0,854	4	2	5	0,643	0,556	0,643	2
5	0,556	5	9	6	0,756	0,754	0,756	9
6	0,754	6	4	7	0,854	0,622	0,854	4
7	0,622	7	4	1	0,854	0,849	0,854	4
8	0,553	8	8	8	0,553	0,553	0,553	8
9	0,756	9	6	5	0,754	0,556	0,754	6
10	0,612	10	2	8	0,643	0,553	0,643	2
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Duplas para Torneio </div>								

Figura 4-26 – Interface do Algoritmo – Macro: Duplas para Torneio

Após o torneio, a população de soluções selecionada é chamada de “pais” e submetida ao processo de recombinação aritmética, através da qual duas soluções “pais” (P_1 e P_2) se combinam para produzir duas soluções “filhas” (S_1 e S_2), conforme as equações 4-19 e 4-20. É importante ressaltar que a recombinação ocorre com somente 70% dos parâmetros das soluções, e não com toda população.

$$S_1 = \beta P_1 + (1 - \beta) P_2 \quad (4-19)$$

$$S_2 = \beta P_2 + (1 - \beta) P_1 \quad (4-20)$$

Em que β um número aleatório entre 0 e 1.

As duplas combinadas foram determinadas aleatoriamente e esta etapa do algoritmo ocorre pelo acionamento da macro “Crossover”, conforme indicação da Figura 4-27. As células que informam “VERDADEIRO” referem-se aos indivíduos selecionados para a recombinação.

PAIS - Taxa de Recombinação 70%							
solução	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
1	VERDADEIRO	FALSO	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO	FALSO	FALSO
2							
3	VERDADEIRO	VERDADEIRO	FALSO	FALSO	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
4							
5	VERDADEIRO	VERDADEIRO	FALSO	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
6							
7	FALSO	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO	FALSO	VERDADEIRO
8							
9	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO	FALSO	VERDADEIRO	FALSO	VERDADEIRO
10							
Geração - Pós Recombinação							
solução	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
1	0,027	0,495	2,32	5,53	34,54	14,27	2,68
2	0,035	0,258	1,45	7,03	162,42	139,39	3,58
3	0,012	0,797	2,47	3,33	197,93	69,11	6,54
4	0,038	0,446	2,45	5,10	233,79	56,44	3,75
5	0,024	0,161	2,53	7,56	81,78	63,38	2,37
6	0,029	0,702	2,10	5,67	112,69	86,13	3,33
7	0,012	0,684	1,76	7,52	29,91	24,81	5,49
8	0,026	0,209	2,52	6,48	116,49	72,68	5,03
9	0,016	0,751	2,21	3,47	135,80	107,98	3,40
10	0,014	0,136	1,42	2,88	120,89	80,10	5,54

Figura 4-27 – Interface do Algoritmo – Macro: Recombinação

A mutação uniforme foi adotada para substituir o valor de alguns parâmetros das soluções por outro gerado aleatoriamente dentro da respectiva faixa de variação, através da macro “Mutação” (Figura 4-28). Assim como na recombinação, não são todos os parâmetros que são submetidos à mutação, essa etapa do algoritmo é feita com apenas 14% da população de soluções, representadas na figura pela células coma informação “VERDADEIRO”.

Taxa de Mutação 14%							
solução	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
1	FALSO	FALSO	FALSO	VERDADEIRO	FALSO	FALSO	VERDADEIRO
2	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
3	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
4	FALSO	VERDADEIRO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	VERDADEIRO
5	FALSO	VERDADEIRO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
6	VERDADEIRO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
7	VERDADEIRO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
8	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
9	VERDADEIRO	VERDADEIRO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
10	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
Geração Final							
solução	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
1	0,027	0,495	2,322	2,605	34,538	14,272	2,180
2	0,035	0,258	1,447	7,034	162,423	139,385	3,585
3	0,012	0,797	2,471	3,325	197,930	69,114	6,542
4	0,038	0,161	2,446	5,101	233,789	56,439	2,077
5	0,024	0,162	2,534	7,561	81,776	63,390	2,372
6	0,014	0,702	2,097	5,673	112,607	66,126	3,331
7	0,012	0,684	1,757	7,515	29,908	24,813	5,495
8	0,026	0,209	2,518	6,478	116,494	72,681	5,026
9	0,013	0,174	2,210	3,475	135,785	107,975	3,405
10	0,014	0,136	1,425	2,881	120,886	80,106	5,544

Figura 4-28 – Interface do Algoritmo – Macro: Mutação

Após a mutação, uma nova população de soluções foi criada (“Geração Final”) para dar continuidade ao processo de calibração, reiniciando o algoritmo a partir da avaliação da função objetivo para cada solução.

Como essa etapa do processo de calibração exige bastante esforço operacional, o critério de parada adotado foi o número de gerações, fixado em 40. A Figura 4-29 a seguir ilustra os passos do algoritmo.

Figura 4-29– Fluxograma do Algoritmo de Otimização

4.6.2.2 Calibração dos Parâmetros Variáveis Espacialmente

Para calibrar os parâmetros variáveis espacialmente de todas as onze configurações, contou-se com o suporte do software de simulação PCSWMM.NET (JAMES ET AL., 2008). Esse software possui uma ferramenta de calibração denominada *Sensitivity-based Radio Tuning Calibration* (SRTC).

Essa ferramenta de calibração utiliza gradientes de sensibilidade para estimar os parâmetros que melhor ajustam os hidrogramas de saída do SWMM ao hidrograma observado, através de barras de rolagem que permitem variar os valores dos parâmetros a serem calibrados, manualmente. Dessa maneira uma solução satisfatória foi encontrada, puderam-se verificar os valores dos novos parâmetros e salvá-los em um novo arquivo.

A Tabela 4-16 apresenta os parâmetros calibrados e os respectivos intervalos de variação, cujos valores iniciais foram apresentados anteriormente (os valores iniciais de

rugosidade por trecho foram apresentados na Tabela 4-10). Os intervalos baseiam-se no Manual do Usuário do SWMM (ROSSMAN, 2007).

Tabela 4-16 - Intervalos dos parâmetros calibrados variáveis espacialmente			
Sigla	Parâmetro	Variação (%)	
		Mínimo	Máximo
W	Largura	-100	100
S	Declividade	-100	100
AI	Áreas Impermeáveis	-100	100
Ncn	Rugosidade dos canais naturais:		
	CP1, CP2, CS1, CS2, CT1	-70	0
	CP3	-40	100
	CP4, CP5, CS4, CT2, CT3, CT4	-33	122
	CS3	-62	25
Ng,s	Rugosidade das galerias e sarjetas	-15	15

Os valores dos parâmetros não variáveis espacialmente, encontrados pela calibração com o algoritmo genético foram mantidos fixos durante a calibração dos parâmetros variáveis. Nessa etapa do processo a função objetivo descrita pela Equação 4-10 foi novamente avaliada.

4.6.3 Validação

O processo de validação dos parâmetros já calibrados teve como objetivo avaliar a eficiência do SWMM em simular hidrogramas condizentes com a realidade e, principalmente, analisar os diferentes níveis de detalhamento da rede de drenagem. Para cada configuração utilizou-se a média aritmética dos valores dos parâmetros resultantes das calibrações de cada evento.

Os eventos 2, 7, 49 e 53 da Tabela 4-12 foram selecionados para a validação, para a qual foram adotados o desvio de pico de vazão e coeficiente de eficiência, descritos pelas equações 4-15 e 4-18, para quantificar os resultados.

Após a realização das simulações a rede de drenagem existente foi avaliada com o intuito de localizar e quantificar as galerias pluviais sub-dimensionadas, ou seja, com geometria incapaz de suportar os volumes de água gerados pelos eventos de precipitação.

5 Resultados e Discussão

O modelo hidrológico SWMM5 foi utilizado como ferramenta em três etapas desse trabalho, conforme fluxograma apresentado no item 4.6. Os resultados foram apresentados na ordem em que as etapas foram realizadas.

5.1 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade, realizada para as configurações 1, 4 e 8, possibilitou verificar a influência dos parâmetros do SWMM sobre os hidrogramas de resposta da bacia em estudo.

Foram obtidos resultados similares para os três eventos utilizados nesta etapa do trabalho. Para as três configurações analisadas, o parâmetro que influenciou os hidrogramas resultantes de forma mais decisiva em relação à vazão de pico foi a porcentagem de áreas impermeáveis (AI), chegando a alterar a vazão de pico em 90,7% para a Configuração 1, sob efeito do evento 27 (Figura 5-2). Os resultados referentes à variação desse parâmetro foram apresentados separadamente nas Figuras 5-1, 5-2 e 5-3. Os outros parâmetros que exerceram influência considerável sobre a vazão de pico dos hidrogramas de resposta da bacia foram: largura das sub-bacias (W), capacidades de infiltração (I) e coeficientes de rugosidade de Manning (N_{cn} e $N_{g,s}$), como ilustram as figuras 5-4 a 5-12.

Figura 5-1 – Influência da porcentagem de áreas impermeáveis sobre a vazão de pico – Evento 12

Figura 5-2 – Influência da porcentagem de áreas impermeáveis sobre a vazão de pico – Evento 27

Figura 5-3 – Influência da porcentagem de áreas impermeáveis sobre a vazão de pico – Evento 52

Figura 5-4 – Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 12, Configuração 1

Figura 5-5 - Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 27, Configuração 1

Figura 5-6 - Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 52, Configuração 1

Figura 5-7 – Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 12, Configuração 4

Figura 5-8 - Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 27, Configuração 4

Figura 5-9 - Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 52, Configuração 4

Figura 5-10– Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 12, Configuração 8

Figura 5-11 - Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 27, Configuração 8

Figura 5-12 - Influência dos parâmetros sobre a vazão de pico – Evento 52, Configuração 8

Os gráficos das figuras 5-4 a 5-12 mostram que a rugosidade das galerias pluviais e sarjetas exerce maior influência sobre o hidrograma da Configuração 1, uma vez que essa é a configuração que apresenta maior quantidade de galerias e sarjetas. Para a Configuração 4 é notável a influência da rugosidade dos canais naturais, enquanto que para a Configuração 8 tais parâmetros não alteram os hidrogramas significativamente.

O tempo de ocorrência dos picos de vazão mostrou-se pouco sensível à alteração dos parâmetros, sofrendo variações inferiores a 4%, como ilustra a Figura 5-13, referente ao evento 12 e à Configuração 1, e que representa o comportamento dos demais eventos e configurações.

Figura 5-13 – Influência dos parâmetros sobre o tempo de pico – Evento 12, Configuração 1

Quanto ao volume total escoado, para os três eventos e configurações, os hidrogramas apresentaram comportamentos similares quando submetidos às variações dos parâmetros, podendo ser visualizados na Figura 5-14, referente ao evento 12, Configuração 1.

O parâmetro que exerceu maior influência sobre o volume escoado foi a porcentagem de área impermeável (AI), que chegou a promover uma variação de volume superior a 90%, seguida das capacidades de infiltração (I), que alteraram o volume em mais de 40%. Como era esperado, os demais parâmetros não alteraram o volume total escoado.

Figura 5-14– Influência dos parâmetros sobre o volume escoado – Evento 12, Configuração 1.

5.2 Calibração do SWMM

5.2.1 Parâmetros Não Variáveis Espacialmente

A calibração dos parâmetros do SWMM, supostamente invariáveis no espaço (NI, NP, DI, DP, I0, Ib, k), foi realizada através da implementação do algoritmo genético por meio da construção de macros do programa Excel. As figuras 5-15 a 5-17, a seguir, ilustram a evolução do algoritmo, ao longo das gerações para cada evento calibrado.

Figura 5-15 – Evolução dos valores de aptidão ao longo das gerações do AG – Evento 12.

Observa-se que, para o evento 12, o melhor valor foi obtido na geração 34, o que permite concluir que, provavelmente, um valor ainda maior poderia ser encontrado com a produção de outras gerações.

Figura 5-16 - Evolução dos valores de aptidão ao longo das gerações do AG – Evento 24.

Figura 5-17 - Evolução dos valores de aptidão ao longo das gerações do AG – Evento 52.

Para o evento 24, a geração 29 produziu o melhor valor, que foi mantido durante as demais gerações até o final da calibração. Já o evento 52 teve seu melhor valor obtido para a geração 25. A evolução dos coeficientes de variação (ou desvio padrão adimensional) permite verificar a diferença entre os valores obtidos para a geração em questão.

Após as 40 gerações o valor médio máximo obtido para o coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (COE) foi de 0,83 (0,86 para o evento 12; 0,89 para o evento 24; e 0,74 para o evento 52). Gottschalk e Motovilov (2000)¹ (apud MELLO ET AL., 2007) estabelecem uma faixa de valores aceitáveis para o coeficiente de 0,36 a 0,75, dentro da qual se encontra o menor valor obtido durante essa etapa da calibração. A partir de 0,75 são considerados adequados, como é o caso dos demais valores alcançados. Na Tabela 5-1 abaixo são apresentados os resultados obtidos para os parâmetros e para o COE na calibração de cada evento. Cabe lembrar que a média aritmética dos valores obtidos para os parâmetros foram utilizadas nas etapas posteriores.

¹ Gottschalk, L.; Motovilov, Y. Macro-scale hydrological modeling – a scandinavian experience. In: International Symposium on: 'Can science and society save the water crisis in the 21st century – reports from the World', 2000, Tokyo. Anais...Tokyo: Japan Society of Hydrology and Water Resources, 2000. p.38-45.

Tabela 5-1 – Resultados obtidos na calibração manual

Evento	NI -	NP -	DI (mm)	DP (mm)	I0 (mm/h)	Ib (mm/h)	k (1/h)	COE
12	0,018	0,155	1,63	3,88	36,61	21,30	2,26	0,86
24	0,030	0,101	1,40	2,55	8,39	5,70	2,49	0,89
52	0,012	0,116	1,39	2,96	21,20	5,99	6,48	0,74
Média	0,020	0,124	1,47	3,13	22,07	11,00	3,74	0,83

Os valores médios obtidos para os parâmetros foram muito similares aos valores encontrados por Barbassa et al. (2005) para a mesma área em estudo (DI = 1,5 mm; DP = 4,9 mm; I0 = 28,8 mm/h; Ib = 9,4 mm/h; k = 3,6 h⁻¹).

5.2.2 Parâmetros Variáveis Espacialmente

Os parâmetros considerados variáveis espacialmente (W, S, AI, Ncn, Ng,s) são diferentes para cada sub-bacia. Dessa forma, para a calibração de tais parâmetros foram utilizados coeficientes, pelos quais seus valores iniciais fossem multiplicados. Os resultados obtidos para esses coeficientes - iguais para todas as sub-bacias - e os valores alcançados para as funções objetivo analisadas podem ser visualizados na Tabela 5-2.

Cabe lembrar que a média dos valores obtidos para os parâmetros foram utilizadas na posterior validação.

Tabela 5-2 – Resultados obtidos com a calibração automática

Configuração 1						
Evento	Parâmetro					F.O.
	W	S	AI	Ncn	Ng,s	COE
12	1,18	1,03	1,19	0,92	0,97	0,90
24	1,25	1,07	1,07	0,92	0,97	0,89
52	1,19	1,07	1,23	0,90	0,96	0,82
Média	1,21	1,06	1,16	0,91	0,97	0,87

Continuação da Tabela 5-2 – Resultados obtidos com a calibração automática

Configuração 2						
Evento	Parâmetro					F.O.
	W	S	AI	Ncn	Ng,s	COE
12	1,14	1,03	1,16	0,93	0,98	0,87
24	1,12	1,05	1,04	0,94	0,98	0,89
52	1,18	1,06	1,20	0,91	0,97	0,78
Média	1,15	1,05	1,13	0,93	0,98	0,85
Configuração 3						
Evento	Parâmetro					F.O.
	W	S	AI	Ncn	Ng,s	COE
12	1,10	1,03	1,12	0,94	0,98	0,87
24	1,23	1,05	1,19	0,95	0,98	0,63
52	1,18	1,07	1,19	0,92	0,97	0,77
Média	1,17	1,05	1,17	0,94	0,98	0,76
Configuração 4						
Evento	Parâmetro					F.O.
	W	S	AI	Ncn	Ng,s	COE
12	1,10	1,05	1,18	0,96	0,98	0,90
24	1,25	1,05	1,21	0,96	0,98	0,62
52	1,17	1,05	1,20	0,93	0,98	0,77
Média	1,17	1,05	1,20	0,95	0,98	0,76
Configuração 5						
Evento	Parâmetro					F.O.
	W	S	AI	Ncn	Ng,s	COE
12	1,12	1,04	1,22	1,00	-	0,92
24	1,25	1,07	1,25	1,00	-	0,59
52	1,18	1,05	1,23	1,00	-	0,75
Média	1,18	1,05	1,23	1,00	-	0,75
Configuração 6						
Evento	Parâmetro					F.O.
	W	S	AI	Ncn	Ng,s	COE
12	1,14	1,05	1,21	0,96	0,98	0,90
24	1,23	1,06	1,18	0,96	0,98	0,60
52	1,16	1,07	1,21	0,95	0,98	0,77
Média	1,18	1,06	1,20	0,96	0,98	0,76

Continuação da Tabela 5-2 – Resultados obtidos com a calibração automática

Configuração 7						
Evento	Parâmetro					F.O.
	W	S	AI	Ncn	Ng,s	COE
12	1,12	1,05	1,20	0,98	0,98	0,89
24	1,14	1,04	1,15	0,98	0,99	0,62
52	1,12	1,05	1,20	0,97	0,99	0,74
Média	1,13	1,05	1,18	0,98	0,99	0,75
Configuração 8						
Evento	Parâmetro					F.O.
	W	S	AI	Ncn	Ng,s	COE
12	1,10	1,06	1,23	1,00	-	0,89
24	1,11	1,06	1,18	1,00	-	0,58
52	1,10	1,06	1,19	1,00	-	0,74
Média	1,10	1,06	1,20	1,00	-	0,74
Configuração 9						
Evento	Parâmetro					F.O.
	W	S	AI	Ncn	Ng,s	COE
12	1,00	1,07	1,27	1,00	-	0,91
24	1,07	1,07	1,19	1,00	-	0,53
52	1,09	1,09	1,33	1,00	-	0,92
Média	1,05	1,08	1,26	1,00	-	0,79
Configuração 10						
Evento	Parâmetro					F.O.
	W	S	AI	Ncn	Ng,s	COE
12	0,93	1,05	1,27	1,00	-	0,89
24	0,92	1,05	1,21	1,00	-	0,57
52	0,96	1,08	1,32	1,00	-	0,92
Média	0,94	1,06	1,27	1,00	-	0,79
Configuração 11						
Evento	Parâmetro					F.O.
	W	S	AI	Ncn	Ng,s	COE
12	0,93	1,07	1,34	-	-	0,93
24	0,89	1,08	1,28	-	-	0,52
52	0,89	1,04	1,33	-	-	0,90
Média	0,90	1,06	1,32	-	-	0,78

Observa-se que os valores dos coeficientes de multiplicação dos parâmetros obtidos com a calibração variaram de eventos para evento e configuração para configuração. Entretanto, algumas configurações apontam valores similares ou até mesmo iguais. Isso ocorre pelo fato dessas configurações apresentarem níveis de detalhamento muito próximos.

A declividade das sub-bacias não sofreu grandes alterações com a calibração, pois os valores iniciais foram calculados (através do método das quadrículas) e não estimados. As rugosidades dos canais também foram pouco modificadas, principalmente por terem sido empregados valores iniciais já estimados em outros estudos para essa mesma área. As rugosidades das galerias e sarjetas têm um intervalo de variação pequeno, devido ao tipo de material que as revestem, dessa forma também apresentaram baixas alterações. Esses parâmetros, portanto, não precisariam ser calibrados.

As larguras das sub-bacias, por sua vez, tiveram seus valores alterados em média 13,6% dos valores calculados pela metodologia proposta, o que pode ser considerado razoável, por ser um parâmetro de difícil estimativa. O parâmetro que mais variou durante a calibração foi a porcentagem de áreas impermeáveis (média de 20%), o que ocorreu provavelmente pela sensibilidade do hidrograma submetido à alteração desse parâmetro e pela crescente urbanização da área em estudo. A Tabela 5-3, abaixo, mostra os valores iniciais de áreas impermeáveis (Google Earth, 2004) e os valores calibrados, considerados coerentes com a realidade de crescente impermeabilização.

Tabela 5-3 – Valores iniciais e calibrados da porcentagem de áreas impermeáveis

Configuração	AI _{médio} * (%)	
	Inicial	Calibrado
1	32,20	36,14
2	32,14	35,66
3	32,15	36,81
4	32,30	37,73
5	32,26	39,11
6	32,13	37,90
7	32,00	37,78
8	32,27	38,64
9	32,86	41,40
10	32,62	41,48
11	32,00	42,24

*Porcentagem de áreas impermeáveis
médias por sub-bacia

Em relação à função objetivo, o evento 12 foi o que apresentou melhores resultados para o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (COE), para a maioria das configurações da rede de drenagem. Os valores obtidos para os eventos 12 e 52 foram altos para todas as configurações, o que não ocorreu para o evento 24, pelo fato do COE ser mais eficaz para eventos de cheia.

Os hidrogramas resultantes são apresentados nas figuras 5-18 a 5-23 a seguir, referentes aos eventos 12, 24 e 52 e às diversas configurações admitidas.

Figura 5-18 – Hidrogramas Calculados e Observados – Evento 12 (Configurações 1 a 6)

Figura 5-19 – Hidrogramas Calculados e Observados – Evento 12 (Configurações 7 a 11)

Figura 5-20 – Hidrogramas Calculados e Observados – Evento 24 (Configurações 1 a 6)

Figura 5-21 – Hidrogramas Calculados e Observados – Evento 24 (Configurações 7 a 11)

Figura 5-22 – Hidrogramas Calculados e Observados – Evento 52 (Configurações 1 a 6)

Figura 5-23 – – Hidrogramas Calculados e Observados – Evento 52 (Configurações 7 a 11)

Graficamente pode-se perceber que, com a calibração dos parâmetros, os hidrogramas calculados apresentaram comportamentos similares aos observados em termos do volume total escoado, mesmo para as configurações menos detalhadas do sistema de drenagem. Entretanto, diferenças significativas foram observadas em relação às vazões de pico simuladas e observadas.

A Figura 5-24 a seguir apresenta a evolução do coeficiente de eficiência com o aumento do detalhe na representação da bacia e os desvios de volume, para os eventos 12, 24 e 52.

Figura 5-24 – Evolução do COE (parcela superior) e desvios de volume (parcela inferior)

A evolução do coeficiente de eficiência com o nível de detalhamento do sistema apresentou comportamento significativamente diverso para os diferentes eventos, provavelmente devido às características destes. Os eventos 12 e 52, caracterizados por maiores alturas totais de precipitação e intensidades médias muito superiores à do evento 24, geraram volumes de propagação superiores às capacidades dos condutos. Este fato faz com que as galerias atuem como reservatórios de armazenamento temporário, retardando o escoamento.

5.3 Validação

O processo de validação buscou analisar as respostas dos hidrogramas para os diferentes níveis de detalhe do sistema de drenagem da bacia do Córrego do Gregório, a partir dos resultados obtidos na calibração.

Os eventos utilizados nessa fase do estudo apresentaram resultados muito diferentes entre si, dessa forma optou-se por discuti-los separadamente, como segue.

5.3.1 Evento 2

A simulação do Evento 2, associado ao período de retorno de 1 ano, produziu, para todas as configurações, volumes escoados e picos de vazão inferiores aos valores observados e comportamentos muito semelhantes, como pode ser visto nos hidrogramas ilustrados nas figuras 5-25 e 5-26.

Figura 5-25 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 2 (Configurações 1 a 6)

Figura 5-26 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 2 (Configurações 7 a 11)

A Tabela 5-4, a seguir, apresenta os valores obtidos durante a simulação desse evento.

Tabela 5-4 – Valores obtidos com a simulação do Evento 2

Configuração	COE	EVe	Comprimento das Galerias (m)	Volume Reservado (m³)	Qp (m³/s)
1	0,85	28,72	12740	6,87	32,40
2	0,85	28,91	10950	6,58	30,68
3	0,86	27,99	5740	3,4	31,34
4	0,84	28,13	3370	2,72	31,43
5	0,85	26,91	0	0	30,74
6	0,85	28,40	1200	2,98	31,05
7	0,83	29,69	350	2,55	31,69
8	0,85	29,45	0	0	30,64
9	0,85	33,94	0	0	34,10
10	0,83	30,40	0	0	34,68
11	0,84	31,87	0	0	30,44
Média	0,85	29,49	-	-	-

O coeficiente de eficiência variou de 0,83 a 0,86, valores satisfatórios, que comprovam a validade dos parâmetros calibrados. No geral, o volume total escoado simulado foi 29,49% inferior ao observado, porém as configurações não apresentaram variações entre si, o que era esperado, já que se trata do mesmo sistema.

A Figura 5-27 reúne os valores de vazão de pico, porcentagem de áreas impermeáveis (AI) e volumes armazenados pelas galerias, para as diversas configurações, sob efeito do evento 2.

A porcentagem de áreas impermeáveis sofre variação de configuração para configuração, porque, durante o processo de calibração, foi necessário aumentar tal parâmetro para compensar a falta de condutos nas configurações menos detalhadas, buscando hidrogramas simulados mais próximos dos observados. A taxa de impermeabilidade exerce influência expressiva sobre os hidrogramas resultantes, como visto anteriormente durante a análise de sensibilidade, aumentando os valores de vazão de pico para as configurações 9 e 10.

Os volumes armazenados, ilustrados na Figura 5-27, são decorrentes dos volumes de água excedentes às capacidades das galerias. Quando isso ocorre, as galerias pluviais se comportam como reservatórios, armazenando temporariamente o excesso de água e liberando posteriormente pro sistema. Esse comportamento promoveu atrasos e achatamentos dos hidrogramas simulados nessas condições.

Figura 5-27 – Variação de vazão de pico e % de área impermeável e volume armazenado - Evento 2

Para o evento 2, a vazão de pico simulada em cada configuração sofreu influência dos dois fatores supracitados: a porcentagem de áreas impermeáveis e a quantidade de volume armazenado pelo sistema.

5.3.2 Evento 7

Assim como no Evento 2, o Evento 7, associado ao período de retorno de 0,34 anos, simulou volumes inferiores aos observados, para todas as configurações. Porém as vazões de pico modeladas variaram, sendo menores que as observadas para algumas configurações e maiores para outras. O comportamento dos hidrogramas foi bastante semelhante, como pode ser visto nas figuras 5-28 e 5-29 a seguir.

Figura 5-28 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 7 (Configurações 1 a 6)

Figura 5-29 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 7 (Configurações 7 a 11)

Os valores produzidos pela simulação do Evento 7 podem ser visualizados na Tabela 5-5.

Tabela 5-5 – Valores obtidos com a simulação do Evento 7

Configuração	COE	EVe	Comprimento das Galerias (m)	Volume Reservado (m ³)	Qp (m ³ /s)
1	0,85	29,43	12740	0,06	18,06
2	0,85	29,73	10950	0,04	18,20
3	0,85	28,15	5740	0	17,95
4	0,88	24,13	3370	0	17,62
5	0,90	23,35	0	0	15,07
6	0,86	24,47	1200	0	18,26
7	0,86	24,23	350	0	19,32
8	0,89	25,03	0	0	16,61
9	0,86	25,35	0	0	14,83
10	0,91	18,96	0	0	15,42
11	0,88	17,66	0	0	13,43
Média	0,87	24,59	-	-	-

O coeficiente de eficiência variou de 0,85 a 0,91, valores muito satisfatórios, que, assim como para o Evento 2, comprovam a validade dos parâmetros calibrados. O volume total escoado simulado foi 24,59% inferior ao observado.

O comportamento da vazão de pico está ilustrado na Figura 5-30, juntamente com a porcentagem de área impermeável e volume armazenado.

Figura 5-30 – Variação de vazão de pico, % de área impermeável e volume armazenado - Evento 7

Diferentemente do Evento 2, como pode ser visto na Figura 5-30, o Evento 7 não produziu volumes acima das capacidades de propagação do sistema, exceto pelas configurações 1 e 2, que armazenaram temporariamente volumes desprezíveis, inferiores a $0,06 \text{ m}^3$. Dessa forma, as configurações que não apresentavam galerias pluviais em seus sistemas tiveram menores valores de picos de vazão, já que as rugosidades das superfícies dos terrenos são maiores que das galerias, reduzindo a velocidade de escoamento.

As configurações 6 e 7 alcançaram valores de vazão de pico ligeiramente maiores que as configurações 1 e 2, mesmo com menos galerias em seus sistemas. Isso ocorreu em função do aumento da taxa de impermeabilidade, resultante da calibração, para essas configurações.

5.3.3 Evento 49

Para o Evento 49, associado ao período de retorno de 2,44 anos, os volumes calculados foram menores que os observados, exceto para as configurações 9, 10 e 11. As vazões de pico simuladas, por sua vez, foram sempre maiores que a observada. As figuras 5-31 e 5-32 mostram que, mais uma vez os hidrogramas apresentaram comportamentos semelhantes.

Figura 5-31 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 49 (Configurações 1 a 6)

Figura 5-32 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 49 (Configurações 7 a 11)

A Tabela 5-6 mostra os resultados da simulação com o Evento 49.

Tabela 5-6 – Valores obtidos com a simulação do Evento 49

Configuração	COE	EVe	Comprimento das Galerias (m)	Volume Reservado (m ³)	Qp (m ³ /s)
1	0,92	8,54	12740	17,65	38,18
2	0,91	12,16	10950	17,07	36,23
3	0,90	10,97	5740	11,02	37,22
4	0,92	9,02	3370	7,8	39,62
5	0,91	8,16	0	0	42,70
6	0,90	7,55	1200	7,64	38,98
7	0,87	7,08	350	6,21	41,98
8	0,87	7,99	0	0	41,45
9	0,92	0,22	0	0	48,44
10	0,92	1,42	0	0	50,26
11	0,97	4,06	0	0	43,68
Média	0,91	7,02	-	-	-

O evento 49 produziu os melhores valores do coeficiente de eficiência, variando de 0,87 a 0,97, e os volumes totais escoados mais próximos aos observado, com desvio médio de 7,02%, sendo, portanto, este evento, o que melhor representou a realidade registrada pelos dados de precipitação e curva-chave.

A vazão de pico apresentou comportamento semelhante ao do Evento 2, como mostra a Figura 5-33.

Figura 5-33 – Variação de vazão de pico, % de área impermeável e volume armazenado - Evento 49

O volume de água escoado foi superior às capacidades das galerias, ultrapassando 17 m³, gerando armazenamento e atrasando os hidrogramas, como pode ser observado na Figura 5-33. Sendo assim, as simulações com as configurações sem galerias pluviais obtiveram valores maiores para as vazões de pico. Como dito anteriormente, a porcentagem de áreas impermeáveis um pouco maiores, resultantes da calibração para as configurações 9, 10 e 11 colaborou para que os picos de vazão dessas configurações fossem superiores aos picos das demais.

5.3.4 Evento 53

O Evento 53, com período de retorno de 0,05 anos, apresenta condição de umidade antecedente muito diferente dos eventos calibrados (Tabela 4-12). A precipitação acumulada dos cinco dias anteriores aos eventos utilizados na calibração é inferior a 15 mm, já para o Evento 53 é de 55 mm. Por isso os parâmetros de infiltração obtidos pela calibração não representam adequadamente o sistema durante esse evento. Embora haja diferença brusca entre as vazões de pico calculadas e observada, os hidrogramas se comportam de forma semelhante, conforme pode ser visto nas figuras 5-34 e 5-35.

Figura 5-34 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 53 (Configurações 1 a 6)

Figura 5-35 – Hidrogramas Simulados e Observados – Evento 53 (Configurações 7 a 11)

A Tabela 5-7 abaixo apresenta os valores obtidos da simulação do Evento 53.

Tabela 5-7 – Valores obtidos com a simulação do Evento 53

Configuração	COE	EVe	Comprimento das Galerias (m)	Volume Reservado (m ³)	Qp (m ³ /s)
1	0,85	31,52	12740	0,88	18,76
2	0,84	31,46	10950	0,74	18,54
3	0,83	29,83	5740	0,16	18,03
4	0,81	28,53	3370	0,13	17,34
5	0,72	29,70	0	0	15,06
6	0,84	29,00	1200	0,23	16,63
7	0,83	29,57	350	0,30	16,61
8	0,77	28,85	0	0	15,08
9	0,73	25,30	0	0	11,90
10	0,74	24,36	0	0	13,74
11	0,67	23,48	0	0	11,28
Média	0,78	28,33	-	-	-

Os valores do coeficiente de eficiência variaram de 0,67 a 0,85, variação superior aos eventos anteriores, mostrando que, para esse evento, a função objetivo foi mais sensível. O desvio médio de volume escoado foi de 28,33%, valor elevado e provavelmente decorrente da diferença entre as condições de umidade antecedente dos eventos calibrados e do Evento 53.

A vazão de pico variou entre as configurações de forma esperada, como pode ser observado na Figura 4-36.

Figura 5-36 – Variação de vazão de pico, % de área impermeável e volume armazenado - Evento 53

Nota-se que a vazão de pico aumentou com a ampliação do nível de detalhe, como era esperado, já que com maior número de galerias a velocidade de propagação também é maior e como não houve armazenamento temporário significativo pelas galerias pluviais, os hidrogramas não sofreram atrasos.

Observa-se também que, para esse evento, a influência exercida pelas áreas impermeáveis sobre os picos de vazão foi menos expressiva do que o aumento de velocidade imposto ao escoamento pela consideração das galerias pluviais, fazendo com que as configurações mais detalhadas apresentassem maiores valores de vazão.

5.4 Galerias Afogadas

O modelo SWMM, utilizado nas simulações de transformação chuva-vazão desse trabalho, permitiu que fossem localizadas as galerias pluviais afogadas, ou seja, com capacidade de escoamento inferior ao volume de água gerado pelos eventos.

A Tabela 5-8 aponta os pontos críticos da rede de drenagem. Observa-se que há um grande número de galerias problemáticas, que não suportaram volumes advindos de eventos de baixos valores de períodos de retorno, como é o caso do Evento 53 ($Tr = 0,05$ anos). A água que não escoar pelos condutos volta a escoar pelas superfícies das ruas, aumentando a possibilidade de enchentes e trazendo transtornos à população do município. Cabe às autoridades competentes buscar medidas que contornem esses problemas.

Tabela 5-8 – Galerias Pluviais Afogadas

Nó	Evento	Volume (m³)	Diâmetro da Galeria (m)	Coordenadas (m)		Localização	Observação
				O	S		
JGG7.2	2	0,75	0,40	204259	7560472	Rua José Jorge Abi Saab	Cruzamento com a Av. Getúlio Vargas
	49	2,18					
	53	0,07					
JGG7.3	2	0,65	0,40	204293	7560587	Rua José Jorge Abi Saab	Entre a Av. Getúlio Vargas e Av. Gregório Aversa
	7	0,06					
	49	1,21					
	53	0,18					
JGG16.2	49	0,90	0,60	203576	7560555	Rotatória Alois Partel	Cruzamento da Av. Getúlio Vargas com a Rua Germano Fher Júnior
JGG16.4	2	2,10	0,60	203598	7560886	Rua Vicente Pelicano	Cruzamento com a Rua Germano Fher Júnior
	49	4,28					
	53	0,12					
JGG16.5	2	0,46	0,60	203793	7560934	Rua Vicente Pelicano	Cruzamento com a Rua Prof. João Jorge Marmorato
	49	0,87					
	53	0,11					
JGG37.2	49	0,01	0,40	202814	7561663	Av. Comendador Alfredo Maffei	Cruzamento com a Rua Luiz Inácio Lula da Silva
JGG38.1	2	0,05	0,60	202740	7561478	Rua Totó Leite	Entre a Rua Luis Roher e a Rua Oscar Barros
	49	0,53					
JGG38.2	2	0,35	0,60	202734	7561585	Rua Totó Leite	Entre a Rua Oscar Barros e a Av. Com. Alfredo Maffei
	49	0,83					
JGL2.2	49	0,22	0,40	203425	7562404	Rua Treze de Maio	Cruzamento com a Rua Pastor Dias de Andrade
JGL3.9	2	0,50	0,60	203312	7562387	Rua Treze de Maio	Cruzamento com a Rua Abel Giongo
	49	1,73					
	53	0,12					

Continuação da Tabela 5-8 – Galerias Pluviais Afogadas

Nó	Evento	Volume (m ³)	Diâmetro da Galeria (m)	Coordenadas (m)		Localização	Observação
				O	S		
JGL8.1	49	0,03	0,40	202925	7561898	Rua Lucas Perroni	Cruzamento com a Rua Luiz Inácio Lula da Silva
JGG39.5	2	0,48	0,60	202630	7561664	Rua Maj. Manoel Antônio de Mattos	Entre a Rua Silvério Ignarra Sobrinho e a Av. Com. Alfredo Maffei
	49	1,56					
	53	0,04					
JGG41.2	49	0,02	0,60	202510	7562218	Rua Marcolino Lopes Barreto	Cruzamento com a Rua Jesuíno de Arruda
JGG41.4	49	0,36	0,60	202516	7562017	Rua Marcolino Lopes Barreto	Cruzamento com a Rua General Osório
JGG41.6	2	1,53	0,60	202518	7561921	Rua Bento Carlos	Cruzamento com a Rua Marcolino Lopes Barreto
	49	2,94					
	53	0,25					

5.5 Representação dos Elementos do Sistema de Drenagem

O modelo hidrológico SWMM permite que os elementos constituintes do sistema de drenagem sejam representados de diversas maneiras, de forma que fica a critério do usuário escolher a representação que melhor se adéque à bacia hidrográfica em estudo ou às análises em questão.

No presente trabalho, as bocas de lobo, existentes no sistema de drenagem utilizado como objeto de estudo, foram representadas através de nós, ou seja, foram admitidas como sendo elementos pontuais.

Essa simplificação pode ser responsável por alguns resultados obtidos e discutidos anteriormente. Para o SWMM, os elementos pontuais têm características de armazenamento, porém não permitem que o fluxo de água seja desviado para outras direções, como é o caso das estruturas lineares. Dessa forma, os volumes armazenados temporariamente nas simulações dos eventos que produziram escoamento superior às capacidades das galerias, não puderam ser desviados para as superfícies das ruas, como ocorre nos sistemas reais, atrasando e achatando os hidrogramas de descarga resultantes.

Acredita-se que uma representação mais adequada das bocas de lobo venha a produzir resultados mais condizentes com a realidade, e recomenda-se, portanto, que essa hipótese seja verificada em estudos posteriores.

6 Conclusões e Recomendações

O presente trabalho propôs avaliar diferentes níveis de detalhamento na representação do sistema de drenagem de parte da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, que atravessa o centro da cidade de São Carlos, SP, empregando o modelo hidrológico de transformação chuva-vazão *Storm Water Management Model – SWMM*

Para tornar possível a realização desse trabalho determinaram-se as características físicas da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório. Para tanto, foram levantados os dados existentes na literatura e realizadas visitas a campo, que possibilitaram caracterizar seções transversais dos canais naturais, localização, diâmetros e comprimentos das galerias pluviais existentes na malha urbana da bacia.

A análise de sensibilidade dos parâmetros do SWMM possibilitou verificar a influência dos parâmetros: largura, declividade e porcentagem de áreas impermeáveis das sub-bacias, coeficiente de rugosidade e capacidade de armazenamento das superfícies permeáveis e impermeáveis, taxa máxima, mínima e constante de decaimento da infiltração, e coeficiente de rugosidade dos canais naturais, sobre o hidrograma de resposta na seção de saída da bacia em estudo. O parâmetro que exerceu maior influência sobre a vazão de pico, alterando o valor desta em mais de 90%, foi a porcentagem de áreas impermeáveis, seguida dos demais parâmetros: largura das sub-bacias, capacidades de infiltração coeficientes de rugosidade de Manning dos condutos. O tempo de ocorrência dos picos, por sua vez, não apresentou sensibilidade expressiva quando submetido às alterações dos parâmetros. Já, sobre o volume escoado, os parâmetros influentes foram: porcentagem de áreas impermeáveis e capacidades de infiltração, para todos os eventos chuvosos utilizados na análise.

Após análise de sensibilidade, os parâmetros foram calibrados. A rotina de calibração automática, elaborada para determinar os parâmetros supostamente invariáveis no espaço (coeficiente de rugosidade e capacidade de armazenamento das superfícies permeáveis e impermeáveis, capacidade máxima, mínima e constante de decaimento da infiltração), implementou um algoritmo genético simples através macros especialmente construídas dentro da planilha eletrônica Excel. Produziu resultados satisfatórios em termos do coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (COE): 0,86; 0,89 e 0,74 para os três eventos utilizados.

A calibração dos parâmetros supostamente variáveis no espaço (largura, declividade, porcentagem de áreas impermeáveis das sub-bacias e coeficientes de rugosidade de Manning

dos condutos), realizada manualmente com o auxílio da ferramenta SRTC, também produziu resultados satisfatórios para a função objetivo avaliada, mesmo para as configurações mais simplificadas do sistema de drenagem, obtendo valores entre 0,74 e 0,87 para o coeficiente de eficiência (COE), aproximando significativamente os hidrogramas calculados dos observados e comprovando a aplicabilidade do modelo SWMM para a bacia estudada. As vazões de pico simuladas, por sua vez, não alcançaram valores muito próximos dos observados para alguns eventos, porém o coeficiente de eficiência avaliado manteve-se bom, já que considera o hidrograma por completo, enfatizando a importância dos volumes escoados sobre os picos de vazão.

O processo de validação permitiu analisar dos diferentes níveis de detalhamento na representação do sistema de drenagem da bacia em estudo. Os resultados revelaram que a consideração da micro-drenagem é de fundamental importância para a reprodução do processo de transformação chuva-vazão da bacia hidrográfica considerada. Os valores obtidos para as vazões de pico variaram de evento para evento, conforme a quantidade de volume escoado. Para eventos extremos, que produziram volumes de escoamento superiores às capacidades das galerias pluviais, o excesso de água foi armazenado temporariamente de forma virtual, acarretando em atrasos e achatamentos dos hidrogramas resultantes. Entretanto, a análise de eventos mais frequentes mostrou que, quando não há armazenamento temporário de água, o incremento do detalhe da rede de drenagem, produz maiores vazões de pico, ocasionadas pela maior velocidade imposta ao escoamento pelas baixas rugosidades das galerias pluviais, por exemplo. Também é importante lembrar que a falta de manutenção das galerias pluviais, prevista pela Lei 11445/2007, contribui para aumentar a rugosidade destas, diminuindo os picos de vazão dos hidrogramas de saída simulados.

Esse trabalho também permitiu a localização dos elementos de drenagem críticos do sistema estudado, permitindo às autoridades competentes avaliar possibilidades de melhorias em relação aos alagamentos.

Recomenda-se para estudos posteriores:

- Diferentes representações das bocas de lobo do sistema de drenagem para análise comparação dos resultados obtidos por esse trabalho;
- Implementação de programa computacional que permita calibração automática através de algoritmos genéticos;
- Utilização de Sistema de Informação Geográfica (SIG) para otimizar e melhorar as caracterizações dos parâmetros físicos da bacia hidrográfica;

- Avaliação de outras possibilidades de modelagem oferecidas pelo SWMM (Green-Ampt, SCS, entre outras);
- Ampliação da bacia de estudo;
- Levantamento mais aprimorado do mapeamento da bacia em conjunto com a Prefeitura Municipal de São Carlos.

Referências Bibliográficas

- AGYEI, F. O., MAHMOOD, K., HAQUE, M. I. Urban Catchment Models “Brief Examination”. Water Resources Research Center, Washington, DC. Maio, 1981. Disponível em: < http://www.udc.edu/docs/dc_water_resources/technical_reports/report_n_28.pdf >. Acesso em: 30 set. 2008.
- ANDRADE, J. P. M.; MENDIONDO, E. M. Previsão Quantitativa de Precipitação em Curto Prazo para Sistemas de Alerta Antecipado de Cheias em Micro-Bacia Urbana. In: Jornadas Internacionales sobre Gestion del Riesgo de Inundaciones y Deslizamientos de Laderas. Brasil. Maio, 2007.
- ANTONIO, M. A.; ANDRADE, J. P. M. Inundações em São Carlos, SP: Avaliação de Chuvas com Radar. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, INPE, 3255-3262 pp. 21-26 abril 2007.
- ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da Eficiência dos Pavimentos Permeáveis na Redução de Escoamento Superficial. In: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS – Porto Alegre – RS. 1999.
- BALASCIO, C. C., PALMERI, D. J.; GAO, H. Use of Genetic Algorithm and Multi-objective programming for Calibration of a hydrologic model. Transactions of ASCE, 41(3), 615-619. 1998.
- BARBASSA, A. P. Simulação do Efeito da Urbanização sobre Drenagem Pluvial na Cidade de São Carlos, SP. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 328 p. 1991.
- BARBASSA, A. P.; PUGLIESE, P. B.; MOREIRA, J. Estudo de Enchentes Urbanas Associando Rede de Monitoramento Densa, SIG, e Modelo Distribuído. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa, PB, 2005.
- BARROS, R. M. Previsão de Enchentes para o Plano Diretor de Drenagem Urbana de São Carlos (PDDUSC) na Bacia Escola do Córrego do Gregório. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 279 p. 2005.
- BARROS, R. M.; MENDIONDO, E. M.; WENDLAND, E. Cálculo de Áreas Inundáveis Devido a Enchentes para o Plano Diretor de Drenagem Urbana de São Carlos (PDDUSC) na Bacia Escola do Córrego do Gregório. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.12, n.2, 05-17 pp. , Abr/Jun, 2007.
- BERTONI, J. C. Simulação Matemática de uma Cheia Urbana sob Condições de Registros Escassos: Aplicação do Modelo SWMM. In: Drenagem Urbana – Gerenciamento, Simulação e Controle / Org. BRAGA, B.; TUCCI, C. E. M.; TOZZI, M. Porto Alegre: Ed. Universidade / UFRGS / ABRH, 1998.
- BIDONE, F.; TUCCI, C. E. M. Microdrenagem, In: Drenagem Urbana / Organizado por Carlos E. M. Tucci, Rubem La Laina Porto, Mário T. de Barros. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995.

BOLDRIN, R. S. Medidas de Preservação de Áreas Verdes em Cenários de Desenvolvimento Urbano e seus Impactos sobre as Vazões. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, Paraíba. 2005.

BRANDSTETTER, A. Assessment of Mathematical Models for Storm and Combined Sewer Management. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 1976.

BRAVO, J. M.; ALLASIA, D. G.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. E. M. Avaliação Visual e Numérica da Calibração do Modelo Hidrológico IPH II com Fins Educacionais. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, SP. 2007.

CAMORANI, G.; CASTELLARIN, A.; BRATH, A. Effects of Land-Use Changes on the Hydrologic Response of Reclamation Systems. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30, 2005, 561-574 pp. Disponível em: < www.sciencedirect.com >. Acesso em: 28 out. 2007.

CENTRO DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA E CULTURAL (CDCC) –Universidade de São Paulo. 2007.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Calibração Automática do Modelo IPH-2. Anais – XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju, SE. 2001.

DANISH HYDRAULIC INSTITUTE, (DHI) MOUSE User Guide and Reference Manual, Hørsholm, Denmark. 1985.

DAWDY, D. R.; SCHAAKE, J. C.; JR; ALLEY, W. M. User's Guide for Distributed Routing Rainfall-Runoff Model: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 78-90, 146 p. 1978.

DENAULT, C.; MILLAR, R.G.; LENCE, B.J. Assessment of Possible Impacts of Climate Change in an Urban Catchment. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 42 (3), 685–697. 2006.

ELLIOT, A. H.; TROWSDALE, S. A. A Review of Models for Low Impact Urban Stormwater. *Environmental Modelling & Software*, 22 (2007), 394–405. 2007.

ESTEVES, R. L. Estratégias Metodológicas da Bacia Escola para o Gerenciamento Ambiental da Drenagem Urbana. Relatório Final – Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC). Orientador: Eduardo Mário Mendiando. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 2003.

GARCIA, J. I. B. Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da Bacia Hidrográfica do Arroio Cancela. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 169 p. 2005.

GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D. Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da Bacia do Arroio Cancela – RS. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 11, n. 4, Out/Dez 2006, 99-108 pp. 2006.

GAROTTI, L.M.; IMOTO, T.S.; BARBASSA, A.P. Uso da área impermeabilizada diretamente conectada como base para estimação do coeficiente de escoamento superficial e comparação com outras estimativas. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, SP. 2007.

GONÇALVES, M. F. Previsão de chuva com auxílio de radar de tempo visando a sistema de alerta antecipado de inundações em áreas urbanas. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Em andamento. 2008.

HSU, M. H.; CHEN, S. H.; CHANG, T. J. Inundation Simulation for Urban Drainage Basin with Storm Sewer System. *Journal of Hydrology*, 234, 21-37 pp. 2000.

HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E. Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual. U.S. Environmental Protection Agency. Athens, Georgia, 1992.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Disponível em: < www.ibge.gov.br >. Acesso em: 12 ago. 2008.

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, publicado por CHI, Guelph, Ontario, Canada, 2008.

JANG, S.; CHO, M.; YOON, J.; YOON, Y.; KIM, S.; KIM, G.; KIM, L.; AKSOY, H. Using SWMM as a Tool for Hydrologic Impact Assessment. *Desalination*, v. 212, Issues 1-3, 25 June 2007, 344-356 pp. Disponível em: < www.sciencedirect.com >. Acesso em: 28 out. 2007.

KALIN, L.; GOVINDARAJU, R. S.; HANTUSH, M. M. Effect of Geomorphologic Resolution on Modelling of Runoff Hydrograph and Sedimentograph over Small Watersheds. *Journal of Hydrology* 276. 89-111. 2003.

LEE, J. G.; HEANEY, J. P. "Estimation of urban imperviousness and its impacts on stormwater systems" *Journal of Water Resources Planning and Management* 39(4), pp. 321-332. 2003.

LEI 11445/2007 – Diretrizes nacionais para o saneamento básico.

LIMA, G.; BOLDRIN, R. S.; MENDIONDO, E. M.; MAUAD, F. F. Análise de Incertezas de Observações Hidrológicas e sua Influência na Modelagem de Pequenas Bacias Urbanas. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 12 n.1, 107-116. Jan/Mar 2007.

LIONG, S. Y. ET AL. Computer-aided catchment calibration model. *Advances in Engineering Software*, v. 17, 147-154 pp. 1993.

LIONG, S. Y, CHAN, W. T.; SHREE RAM, J. Peak-flow Forecasting with Genetic Algorithm and SWMM. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, 121(8), 613-617. 1995.

LOAGUE, K. M.; FREEZE, A. R. A Comparison of Rainfall-Runoff Modeling Techniques on Small Upland Catchments. *Water Resources Research*, 21(2), 229-248. 1985.

MACHADO, E. S. Modelo Hidrológico Determinístico para Bacias Urbanas. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 286 p. 1981.

MAKSIMOVIC, C. General Overview of Urban Drainage Principles and Practice. Urban Drainage in Specific Climates (IHP-V-Technical Documents in Hydrology). Paris: UNESCO, Vol.1, n.40, p.1-21, 2001.

MELLER, A. Simulação Hidrodinâmica Integrada de Sistema de Drenagem em Santa Maria - RS. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 164 p. 2004. Disponível em: < <http://www.ufsm.br/iurh/DissertacaomestradoAdalbertoMeller/Meller.pdf> >. Acesso em: 23 jan. 2008.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M. Simulação do Deflúvio e Vazão de Pico em Microbacia Hidrográfica com Escoamento Efêmero. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, n.4, p.410–419, 2007.

MENDES, H. C.; MENDIONDO, E. M. Histórico da Expansão Urbana e Incidência de Inundações: O Caso da Bacia do Gregório, São Carlos – SP. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, n. 1, 17-27 pp. 2007.

MOUSSA, R. Effect of Channel Network Topology, Basin Segmentation and Rainfall Spatial Distribution on the Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph Transfer Function. Hydrological Processes 22, 395-419. 2008.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River Flow Forecasting Through Conceptual Models, Part I: A Discussion of Principles, J. Hydrology, 10 (3), pp. 282–290. 1970.

PAIVA, E. M. C. D. Rede de Monitoramento Hidrológico In: Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas / Organizado por Paiva, J. B. D. e Paiva, E. M. C. D. Porto Alegre: ABRH, 2001.

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 226. 328-337. 2008.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS (PMSC). Disponível em: < <http://www.saocarlos.sp.gov.br/> >. Acesso em: 05 set 2007.

OLIVEIRA, R. C. Medidas não estruturais na prevenção e controle de enchentes e áreas urbanas como subsídios para o planejamento do uso e ocupação do solo: Estudo de Caso – Bacia do Córrego do Gregório – São Carlos (SP). Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 141 p. 1999.

PORTO, R. Q.; MELO, D. C. D.; ALMEIDA, C. N.; SILANS, A. M. B. P. Avaliação da Escolha de Diferentes Funções-Objetivo na Calibração Automática do Modelo Hidrológico SMAP. Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 1, p. 27-36, jun. 2008.

QUEIROZ, E. A.; SOUZA, M. P. Simulação de Medidas Mitigadoras dos Efeitos da Urbanização sobre a Drenagem Urbana na Bacia do Córrego do Gregório, São Carlos – SP, utilizando Sistema de Informações Geográficas. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Vitória, ES. Anais 3, 23-30 pp. 1997.

RELATÓRIO PÓLIS. Assessoria Técnica para Elaboração do Plano Diretor de São Carlos. Leitura Técnica da Cidade (Produto 1). São Paulo. 2002.

RENNÓ D. C.; SOARES J. V. Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental, INPE, Relatório Parcial, 2000.

RIGHETTO, A. M. Hidrologia e Recursos Hídricos. Projeto REENGE, EESC/USP. 1998.

ROSSMAN, L. A. Storm Water Management Model, Version 5.0: User's Manual. U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH. 2007. Disponível em: < <http://www.epa.gov/ednnrmrl/models/swmm/index.htm#Downloads> >. Acesso em: 28 set. 2007.

SILVA, K. A. Modelagem da Transformação Chuva-Vazão em uma Pequena Bacia Urbana: Análise de Incertezas. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 115 p. 1998.

SILVA, K. A. Análise da Variabilidade Espacial da Precipitação e Parâmetros Hidrológicos em Bacia Experimental: Estudo da Transformação da Chuva em uma Pequena Bacia Hidrográfica Urbana. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 419 p. 2003.

SOUZA, T.F. Drenagem Urbana Sob Cenários de Longo Prazo Visando Incentivos Ambientais. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 253 p. 2008.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). Urban Hydrology for Small Watersheds. Washington. U. S. Dept. Agr. Technical Release n. 55. 1975.

TEMPRANO, J. et al. Stormwater Quality Calibration by SWMM: A case of study in Northern Spain. Water SA, v. 32, n. 1, Jan 2006, 55-63 pp. Disponível em: < <http://www.wrc.org.za> >. Acesso em: 11 nov. 2007.

TERSTRIEP, M. L.; STALL, J. B. The Illinois Urban Drainage Area Simulator, ILLUDAS. Illinois State Water Survey Bulletin 58. 1974.

THOLIN, A. L. KEIFER, C. T. Hydrology of Urban Runoff. ASCE, J. San Engr. Division, 85, No, SA2:47-106. 1959.

TUCCI, C. E. M.; ORDONEZ, J. S.; SIMÕES, M. L. Modelo Matemático Precipitação - Vazão IPH II. Alguns Resultados. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Fortaleza. Anais IV. 1981.

TUCCI, C. E. M.; ZAMANILLO, E. A.; PASINATO H. D. Sistema de Simulação Precipitação Vazão IPHS1. IPH/UFRGS, Porto Alegre-RS. 66 p. 1989.

TUCCI, C. E. M.; CAMPANA, N. Simulação Distribuída com IPH II – Nova Versão. X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e I Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos do Cone Sul – Gramado. Anais. 1993.

TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos, Editora da UFRGS/ABRH, 1ª ed. da coleção ABRH de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 1998.

TUCCI, C. E. M. Gestão de Águas Pluviais Urbanas. Saneamento para Todos. Programa de Modernização do Setor Saneamento - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Ministério das Cidades. Brasília, 2005.

VISSMAN, W.; LEWIS, G. L. Introduction to Hydrology (Hardcover) Prentice Hall; 5 edition (Oct 19 2002), ISBN-10: 067399337X, ISBN-13: 978-0673993373. 2002.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. Hidrologia Aplicada. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil. 245p. 1975.

WANG, Q. J. The Genetic Algorithm and Its Application to Calibrating Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Research*, 27(9), 2467-2471. 1991.

WARWICK, J. J.; TADEPALLI, P. Efficacy of SWMM Application. *ASCE – Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 117, n. 3, May/June, 1991, 352-366 pp. 1991.

ZAGHLOUL, N. A. Sensitivity Analysis of the SWMM Runoff-Transport Parameters and the Effects of Catchment Discretisation. *Adv. Water Resources*, v. 6, 214-223 pp. Dec. 1983.

ZAGHLOUL, N. A. Flow Simulation in Circular Pipes with Variable Roughness Using SWMM-EXTRAN Model. *ASCE - Journal of Hydraulic Engineering*, v. 124, n. 1, 73-76 pp. , Jan. 1998.

APÊNDICE A – Registro de Precipitação

Tabela A - 1 - Eventos com precipitação total mínima de 10 mm - Fevereiro de 2004 a

Dezembro de 2006

Evento	Data	Início	Término	Precipitação Total (mm)	Duração (min)	Intensidade (mm/h)	Tempo de Retorno (anos)
1	2/6/2004	16:20	16:31	10,1	11	55,09	0,4
2	2/6/2004	17:44	20:14	31,7	150	12,68	1,0
3	2/14/2004	7:45	14:02	36,2	377	5,76	1,0
4	2/14/2004	18:29	21:55	15,1	206	4,40	0,0
5	2/15/2004	0:01	3:38	17,1	217	4,73	0,1
6	2/16/2004	4:38	5:11	10	33	18,18	0,0
7	2/22/2004	20:01	7:04	29,3	663	2,65	0,3
8	2/23/2004	13:30	15:19	12,9	109	7,10	0,0
9	2/24/2004	19:39	0:46	20,7	307	4,05	0,1
10	3/1/2004	18:48	19:19	18,2	31	35,23	0,5
11	5/18/2004	6:01	10:58	10,6	297	2,14	0,0
12	5/23/2004	20:41	21:28	30,5	47	38,94	2,4
13	5/24/2004	20:01	2:11	14,5	370	2,35	0,0
14	6/12/2004	8:24	13:46	13,2	322	2,46	0,0
15	7/19/2004	14:07	16:28	15,8	141	6,72	0,1
16	10/13/2004	18:27	18:39	10,4	12	52,00	0,3
17	10/17/2004	6:57	12:18	21,9	321	4,09	0,1
18	10/19/2004	1:31	4:14	9,4	163	3,46	0,0
19	11/11/2004	9:40	12:56	30,2	196	9,24	0,7
20	11/15/2004	14:46	18:18	36,7	212	10,39	1,5
21	11/15/2004	21:28	3:21	11,9	413	1,73	0,0
22	11/18/2004	13:09	13:34	10,5	25	25,20	0,1
23	2/15/2005	9:54	10:32	10,5	38	16,58	0,0
24	2/26/2005	14:01	15:10	13,3	69	11,57	0,0
25	2/27/2005	16:32	19:55	16,7	203	4,94	0,1
26	3/15/2005	12:30	13:27	14,7	57	15,47	0,1
27	3/16/2005	6:13	11:55	58	342	10,18	8,1
28	3/17/2005	2:11	4:39	20	148	8,11	0,1
29	5/22/2005	2:23	6:59	16,1	276	3,50	0,0
30	5/24/2005	22:41	0:28	24	107	13,46	0,4
31	5/25/2005	3:32	8:09	18,2	277	3,94	0,1
32	8/15/2005	16:03	16:43	12	40	18,00	0,1
33	9/5/2005	4:03	5:48	12,9	105	7,37	0,0
34	10/5/2005	22:04	3:21	14,7	317	2,78	0,0
35	10/7/2005	20:37	23:29	40,5	172	14,13	2,5
36	10/22/2005	19:11	20:54	11,5	103	6,70	0,0
37	10/26/2005	22:29	23:51	13,6	82	9,95	0,0
38	10/29/2005	6:10	10:19	14,9	249	3,59	0,0
39	11/4/2005	20:45	22:56	19,6	131	8,98	0,1
40	11/6/2005	20:10	20:56	17,7	46	23,09	0,2
41	11/9/2005	15:28	16:46	20,2	78	15,54	0,2
42	11/19/2005	10:05	11:15	15	70	12,86	0,1
43	1/19/2006	2:01	3:54	30,9	113	16,41	1,1
44	1/29/2006	3:28	7:07	10,5	219	2,88	0,0
45	2/7/2006	13:27	13:48	17,6	21	50,29	0,9

Continuação da Tabela A - 1 - Eventos com precipitação total mínima de 10 mm - Fevereiro
de 2004 a Dezembro de 2006

46	2/10/2006	20:46	6:29	36,8	583	3,79	0,9
47	2/12/2006	0:29	23:58	11,2	1409	0,48	0,0
48	2/13/2006	0:24	3:16	13,3	172	4,64	0,0
49	2/15/2006	17:30	20:56	41,2	206	12,00	2,4
50	2/22/2006	1:09	3:57	13,2	168	4,71	0,0
51	2/27/2006	19:23	20:39	12,3	76	9,71	0,0
52	3/21/2006	0:34	4:50	50,3	256	11,79	5,1
53	3/23/2006	14:59	17:49	15,8	170	5,58	0,0
54	4/6/2006	17:04	19:55	17,2	171	6,04	0,1
55	6/26/2006	10:43	11:45	12,9	62	12,48	0,0
56	11/19/2006	15:56	17:32	12,5	96	7,81	0,0
57	12/4/2006	19:56	22:23	11,7	147	4,78	0,0

Figura A - 1 – Registro das Precipitações ocorridas em 2004

Figura A - 2 – Registro das Precipitações ocorridas em 2005

Figura A - 3 - Registro das Precipitações ocorridas em 2006

APÊNDICE B – Mapeamento da Rede de Drenagem

Figura B - 1 – Representação do Sistema de Drenagem existente na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório: Prancha 1.

Figura B - 2 – Representação do Sistema de Drenagem existente na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório: Prancha 2

Figura B - 3 – Representação do Sistema de Drenagem existente na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório: Prancha 3

Figura B - 4 – Representação do Sistema de Drenagem existente na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório: Prancha 4

Figura B - 5 – Representação do Sistema de Drenagem existente na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório: Prancha 5

Figura B - 6 – Representação do Sistema de Drenagem existente na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório: Prancha 6

Figura B - 7 – Representação do Sistema de Drenagem existente na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório: Prancha 7

Figura B - 8 – Representação do Sistema de Drenagem existente na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório: Prancha 8

Figura B - 9 – Representação do Sistema de Drenagem existente na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório: Prancha 9

Figura B - 11 – Representação do Sistema de Drenagem existente na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório: Prancha 11

Figura B - 12 – Representação do Sistema de Drenagem existente na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório: Prancha 12

Figura B - 13 – Representação do Sistema de Drenagem existente na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório: Prancha 13

Figura B - 14 – Representação do Sistema de Drenagem existente na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório: Prancha 14

Figura B - 15 – Representação do Sistema de Drenagem existente na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório: Prancha 15

Figura B - 17 – Representação do Sistema de Drenagem existente na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório: Prancha 17

APÊNDICE C – Detalhamento das Seções Transversais

Figura C 1 – Mapeamento das diferentes seções transversais

Figura C 2 – Seção transversal CP1 e CS1

Figura C 3 - Seção transversal CP2

Figura C 4 - Seção transversal CS2 e CT1

Figura C 5 - Seção transversal CP3

Figura C 6 - Seção transversal CS3

Figura C 7 - Seção transversal CP4

Figura C 8 - Seção transversal CS4, CT2, CT3 e CT4

Figura C 9 - Seção transversal CP5

APÊNDICE D – Características da Bacia Hidrográfica do Córrego do Gregório –
Arquivos de Entrada do SWMM

EPA STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.0 (Build 5.0.013)

CONFIGURAÇÃO 1

Subcatchment Summary

Name	Outlet	Area (ha)	Width (m)	% Slope (%)	% Imperv (%)	Subarea Routing	Percent Routed (%)
SG1	JP1	20.3	609	1.5	0	OUTLET	100
SG2	JP1	5	443	2.17	0	OUTLET	100
SG3	JS1	9	341	1.92	0	OUTLET	100
SG4	JS1	8.4	407	1.88	0	OUTLET	100
SG5	JP2	4.8	542	1.8	0	OUTLET	100
SG6	JP2	1.6	331	3.7	0	OUTLET	100
SG7	JP2	2.1	356	2.21	0	OUTLET	100
SG8	JP2	6.7	524	2.07	0	OUTLET	100
SG9	JP3	49.7	1569	2.4	0	OUTLET	100
SG10	JP3	46.8	1911	2.73	0	OUTLET	100
SG11	JS2.1	0.1	169	2.25	0	OUTLET	100
SG12	JS2.1	1.6	186	3.5	0	OUTLET	100
SG13	JS2.2	19.4	750	3.29	0	OUTLET	100
SG14	JS2.2	15.7	788	4.06	0	OUTLET	100
SG15	JT1	1.8	443	4.36	0	OUTLET	100
SG16	JT1	4.1	466	3.5	0	OUTLET	100
SG17	JS2.2	14	640	3.24	0	OUTLET	100
SG18	JS2.2	6.5	539	4.37	0	OUTLET	100
SG19	JP3	22.6	1459	2.54	0	OUTLET	100
SG20	JP3	44.5	1144	2.45	0	OUTLET	100
SG21	JP4	22.1	693	1.47	30	PERVIOUS	10
SG22	JP4	10.4	673	1.91	20	PERVIOUS	10
SG23	JGG1.1	2.5	236	1.47	75	PERVIOUS	10
SG24	JGG1.1	2	199	1.47	35	PERVIOUS	10
SG25	JGG1.2	1.5	307	1.47	55	PERVIOUS	10
SG26	JGG1.2	5.8	456	1.47	15	PERVIOUS	10
SG27	JP5	1.1	132	1.47	10	PERVIOUS	10
SG28	JP5	14	1527	1.91	40	PERVIOUS	10
SG29	JGG2.1	3.1	605	1.91	10	PERVIOUS	10
SG30	JGG2.1	1.5	430	1.91	20	PERVIOUS	10
SG31	JP6	1.2	222	1.47	10	PERVIOUS	10
SG32	JP6	2	381	1.91	30	PERVIOUS	10
SG33	JGG3.1	1.8	300	1.91	25	PERVIOUS	10
SG34	JGG3.1	1.5	300	1.91	30	PERVIOUS	10
SG35	JP7	0.7	206	1.47	5	PERVIOUS	10
SG36	JP7	1.4	273	1.91	25	PERVIOUS	10
SG37	JGG4.1	0.6	220	1.91	50	PERVIOUS	10
SG38	JGG4.1	0.8	249	1.91	15	PERVIOUS	10
SG39	JP8	1.4	256	1.47	10	PERVIOUS	10
SG40	JP8	1.4	271	1.91	25	PERVIOUS	10
SG41	JGG5.1	0.5	182	1.91	60	PERVIOUS	10
SG42	JGG5.1	0.8	283	1.91	15	PERVIOUS	10
SG43	JP9	0.5	136	1.47	5	PERVIOUS	10
SG44	JP9	1.4	256	1.91	25	PERVIOUS	10
SG45	JGG6.1	6.9	732	1.91	15	PERVIOUS	10
SG46	JGG6.1	3.7	261	1.91	10	PERVIOUS	10

SG47	JGG6.2	0.7	222	1.91	40	PERVIOUS	10
SG48	JGG6.2	0.8	232	1.91	10	PERVIOUS	10
SG49	JP10	3.4	317	1.47	15	PERVIOUS	10
SG50	JP10	0.8	233	1.91	30	PERVIOUS	10
SG51	JGG7.1	9	429	1.47	10	PERVIOUS	10
SG52	JGG7.1	7.2	386	1.47	35	PERVIOUS	10
SG53	JGG7.2	5.7	449	1.468	35	PERVIOUS	10
SG54	JGG7.2	3.3	284	1.468	85	PERVIOUS	10
SG55	JGG7.3	1.7	236	1.468	65	PERVIOUS	10
SG56	JGG7.3	2.9	335	1.468	55	PERVIOUS	10
SG57	JP11	0.4	197	1.468	0	OUTLET	100
SG58	JP11	0.001	0	0	0	OUTLET	100
SG59	JGG8.1	0.4	92	1.468	100	PERVIOUS	10
SG60	JGG8.1	0.2	93	1.468	0	OUTLET	100
SG61	JP12	0.6	235	1.468	60	PERVIOUS	10
SG62	JP12	1	327	1.906	60	PERVIOUS	10
SG63	JGG9.1	0.7	223	1.906	45	PERVIOUS	10
SG64	JGG9.1	1.7	235	1.906	20	PERVIOUS	10
SG65	JP13	0.6	101	1.468	10	PERVIOUS	10
SG66	JP13	3.2	403	1.906	55	PERVIOUS	10
SG67	JGG10.1	1.1	232	1.468	30	PERVIOUS	10
SG68	JGG10.1	0.4	151	1.468	10	PERVIOUS	10
SG69	JGG11.1	1	270	1.906	85	PERVIOUS	10
SG70	JGG11.1	0.7	262	1.906	90	PERVIOUS	10
SG71	JP14	1	238	1.468	10	PERVIOUS	10
SG72	JP14	0.5	117	1.906	80	PERVIOUS	10
SG73	JGG12.1	0.5	171	1.468	15	PERVIOUS	10
SG74	JGG12.1	1.2	198	1.468	10	PERVIOUS	10
SG75	JGG13.1	0.6	226	1.906	75	PERVIOUS	10
SG76	JP15	0.8	127	1.468	10	PERVIOUS	10
SG77	JP15	0.4	80	1.906	10	PERVIOUS	10
SG78	JGG14.1	1.2	226	1.906	100	PERVIOUS	10
SG79	JGG14.1	0.5	212	1.906	85	PERVIOUS	10
SG80	JP16	1.9	215	1.468	70	PERVIOUS	10
SG81	JP16	1.1	145	1.906	10	PERVIOUS	10
SG82	JGG15.1	7.3	523	1.468	15	PERVIOUS	10
SG83	JGG15.1	2.2	290	1.468	20	PERVIOUS	10
SG84	JGG15.2	1.9	167	1.468	65	PERVIOUS	10
SG85	JGG15.2	2.4	295	1.468	25	PERVIOUS	10
SG86	JP17	3.5	273	1.468	20	PERVIOUS	10
SG87	JP17	0.4	143	1.906	10	PERVIOUS	10
SG88	JGG16.1	3.7	312	1.468	25	PERVIOUS	10
SG89	JGG16.1	11.5	652	1.468	30	PERVIOUS	10
SG90	JGG16.2	7.9	391	1.468	60	PERVIOUS	10
SG91	JGG16.2	12.5	644	1.468	50	PERVIOUS	10
SG92	JGG16.3	2.5	266	1.468	45	PERVIOUS	10
SG93	JGG16.3	4.9	308	1.468	70	PERVIOUS	10
SG94	JGG16.4	2.9	384	1.468	45	PERVIOUS	10
SG95	JGG16.4	1.5	283	1.468	50	PERVIOUS	10
SG96	JGG16.4	3.2	372	1.468	55	PERVIOUS	10
SG97	JGG16.4	3	374	1.468	45	PERVIOUS	10
SG98	JGG16.5	0.9	242	1.468	80	PERVIOUS	10
SG99	JGG16.5	1.7	274	1.468	45	PERVIOUS	10
SG100	JGG17.1	0.5	117	1.906	20	PERVIOUS	10
SG101	JGG17.1	0.5	133	1.906	65	PERVIOUS	10
SG102	JP18	1.3	341	1.468	90	PERVIOUS	10
SG103	JP18	0.7	137	1.906	100	PERVIOUS	10
SG104	JGG18.1	0.7	222	1.468	100	PERVIOUS	10
SG105	JGG18.1	0.2	96	1.468	60	PERVIOUS	10
SG106	JP19	1.3	147	1.468	95	PERVIOUS	10
SG107	JP19	6.1	506	1.906	55	PERVIOUS	10
SG108	JGG19.1	0.4	133	1.468	100	PERVIOUS	10

SG109	JGG19.1	1.3	197	1.468	95	PERVIOUS	10
SG110	JGG20.1	4.5	453	1.906	25	PERVIOUS	10
SG111	JGG20.1	2.1	285	1.906	90	PERVIOUS	10
SG112	JP20	1.7	261	1.468	70	PERVIOUS	10
SG113	JP20	26.4	1449	1.906	35	PERVIOUS	10
SG114	JGG21.1	3.6	357	1.468	85	PERVIOUS	10
SG115	JGG21.1	0.5	155	1.468	40	PERVIOUS	10
SG116	JGG21.2	3.5	304	1.468	100	PERVIOUS	10
SG117	JGG21.2	1.1	190	1.468	85	PERVIOUS	10
SG118	JP21	2	215	1.468	70	PERVIOUS	10
SG119	JP21	10.4	1242	1.906	10	PERVIOUS	10
SG120	JGG22.1	4.5	746	1.938	95	PERVIOUS	10
SG121	JGG22.1	4.7	1169	1.938	100	PERVIOUS	10
SG122	JP22	0.6	125	1.938	75	PERVIOUS	10
SG123	JP22	0.9	199	2.416	25	PERVIOUS	10
SG124	JGG23.1	0.3	133	1.938	85	PERVIOUS	10
SG125	JGG24.1	0.9	194	2.416	50	PERVIOUS	10
SG126	JP23	0.4	120	1.938	100	PERVIOUS	10
SG127	JP23	0.4	129	2.416	30	PERVIOUS	10
SG128	JGG25.1	1.5	365	1.938	75	PERVIOUS	10
SG129	JGG25.1	1.4	367	1.938	90	PERVIOUS	10
SG130	JGG26.1	1.1	259	2.416	95	PERVIOUS	10
SG131	JP24	0.6	183	2.416	60	PERVIOUS	10
SG132	JGG27.1	1.9	369	2.416	100	PERVIOUS	10
SG133	JP25	0.7	194	1.938	55	PERVIOUS	10
SG134	JP25	0.3	87	2.416	30	PERVIOUS	10
SG135	JGG28.1	0.3	60	2.416	0	OUTLET	100
SG136	JP26	1.6	282	1.938	100	PERVIOUS	10
SG137	JP26	0.2	84	2.416	0	OUTLET	100
SG138	JGG29.1	2	276	1.938	90	PERVIOUS	10
SG139	JGG29.2	1.7	254	1.938	40	PERVIOUS	10
SG140	JP27	0.4	140	1.938	0	OUTLET	100
SG141	JP27	0.1	72	2.416	0	OUTLET	100
SG142	JGG30.1	0.2	76	2.416	85	PERVIOUS	10
SG143	JP28	0.5	107	1.938	50	PERVIOUS	10
SG144	JP28	0.6	100	2.416	60	PERVIOUS	10
SG145	JGG31.1	2.5	299	2.416	75	PERVIOUS	10
SG146	JGG31.2	1	228	2.416	75	PERVIOUS	10
SG147	JGG31.3	1.3	234	2.416	65	PERVIOUS	10
SG148	JP29	0.1	112	1.938	0	OUTLET	100
SG149	JP29	0.6	157	2.416	55	PERVIOUS	10
SG150	JGG32.1	0.7	117	2.416	95	PERVIOUS	10
SG151	JP30	2.9	396	1.938	80	PERVIOUS	10
SG152	JP30	0.8	240	2.416	95	PERVIOUS	10
SG153	JGG33.1	0.2	121	1.938	10	PERVIOUS	10
SG154	JGG33.1	3.1	360	1.938	75	PERVIOUS	10
SG155	JP31	1.3	397	1.938	65	PERVIOUS	10
SG156	JP31	0.3	71	2.416	60	PERVIOUS	10
SG157	JGG34.1	0.9	165	2.416	80	PERVIOUS	10
SG158	JP32	0.5	162	1.938	100	PERVIOUS	10
SG159	JP32	0.5	168	2.416	45	PERVIOUS	10
SG160	JGG35.1	0.1	75	1.938	100	PERVIOUS	10
SG161	JP33	0.8	178	1.938	30	PERVIOUS	10
SG162	JP33	0.2	99	2.416	0	OUTLET	100
SG163	JGG36.1	0.4	142	2.416	45	PERVIOUS	10
SG164	JP34	0.8	130	1.938	45	PERVIOUS	10
SG165	JP34	0.1	136	2.416	100	PERVIOUS	10
SG166	JGG37.1	0.5	103	2.416	100	PERVIOUS	10
SG167	JGG37.2	0.6	98	2.416	85	PERVIOUS	10
SG168	JP35	3	510	1.67	85	PERVIOUS	10
SG169	JP35	0.3	90	2.416	75	PERVIOUS	10
SG170	JGG38.1	1.7	455	1.648	100	PERVIOUS	10

SG171	JGG38.1	16.1	1092	1.648	80	PERVIOUS	10
SG172	JGG38.2	1.2	318	1.648	85	PERVIOUS	10
SG173	JGG38.2	3.5	635	1.648	100	PERVIOUS	10
SG174	JP36	0.9	147	1.648	55	PERVIOUS	10
SG175	JP36	1.4	218	1.87	65	PERVIOUS	10
SG176	JGG39.1	3.2	534	1.648	85	PERVIOUS	10
SG177	JGG39.1	4.1	666	1.648	70	PERVIOUS	10
SG178	JGG39.2	3.6	468	1.648	95	PERVIOUS	10
SG179	JGG39.2	2.7	552	1.648	95	PERVIOUS	10
SG180	JGG39.3	3.9	418	1.648	100	PERVIOUS	10
SG181	JGG39.3	1.6	530	1.648	85	PERVIOUS	10
SG182	JGG39.4	1.1	148	1.648	80	PERVIOUS	10
SG183	JGG39.4	0.9	237	1.648	95	PERVIOUS	10
SG184	JGG39.5	1.1	263	1.648	90	PERVIOUS	10
SG185	JGG39.5	1.2	249	1.648	75	PERVIOUS	10
SG186	JGG40.1	0.6	127	1.87	85	PERVIOUS	10
SG187	JP37	2.6	244	1.648	25	PERVIOUS	10
SG188	JP37	1.2	194	1.87	60	PERVIOUS	10
SG189	JGG41.1	10.5	455	1.87	85	PERVIOUS	10
SG190	JGG41.1	1.8	446	1.87	75	PERVIOUS	10
SG191	JGG41.2	5.6	576	1.87	80	PERVIOUS	10
SG192	JGG41.2	1.9	282	1.87	95	PERVIOUS	10
SG193	JGG41.3	6	504	1.87	95	PERVIOUS	10
SG194	JGG41.4	2.9	283	1.87	100	PERVIOUS	10
SG195	JGG41.4	1.9	303	1.87	100	PERVIOUS	10
SG196	JGG41.5	0.6	204	1.87	100	PERVIOUS	10
SG197	JGG41.6	2	243	1.87	100	PERVIOUS	10
SG198	JGG41.6	0.4	117	1.87	65	PERVIOUS	10
SG199	JP38	3.5	407	1.648	15	PERVIOUS	10
SG200	JP38	0.6	203	1.87	75	PERVIOUS	10
SG201	JGG42.1	0.4	181	1.87	100	PERVIOUS	10
SG202	JP38	0.3	103	1.87	0	OUTLET	100
SG203	JP39	2.4	476	1.648	20	PERVIOUS	10
SG204	JP39	1.7	231	1.87	100	PERVIOUS	10
SG205	JGG43.1	3	444	1.87	95	PERVIOUS	10
SG206	JGG43.1	0.1	120	1.87	10	PERVIOUS	10
SG207	JGG43.2	2	281	1.87	75	PERVIOUS	10
SG208	JGG43.2	0.5	204	1.87	100	PERVIOUS	10
SG209	Out1	5.1	575	1.648	40	PERVIOUS	10
SG210	Out1	1.4	291	1.87	65	PERVIOUS	10
SI1	JS3.1	0.1	122	1.038	0	OUTLET	100
SI2	JS3.1	0.2	114	1	0	OUTLET	100
SI3	JS3.2	3.1	346	2.136	0	OUTLET	100
SI4	JS3.2	5.9	328	2.5	35	PERVIOUS	10
SI5	JGI1.1	4.4	397	2.5	0	OUTLET	100
SI6	JGI1.2	0.9	325	2.5	40	PERVIOUS	10
SI7	JS3.3	60.1	1994	2.136	0	OUTLET	100
SI8	JS3.3	40.5	1726	2.5	35	PERVIOUS	10
SI9	JGI2.1	1.2	308	2.136	0	OUTLET	100
SI10	JGI2.1	1.2	310	2.136	0	OUTLET	100
SI11	JP21	0.6	229	2.136	0	OUTLET	100
SI12	JP21	0.3	153	2.5	55	PERVIOUS	10
SL1	JS4.1	0.3	145	2.67	0	OUTLET	100
SL2	JS4.1	0.2	147	1.75	0	OUTLET	100
SL3	JS4.2	3.9	497	2.25	0	OUTLET	100
SL4	JS4.2	5.3	527	2.25	0	OUTLET	100
SL5	JT2	1	256	2.88	0	OUTLET	100
SL6	JT2	0.7	273	1.5	0	OUTLET	100
SL7	JS4.2	1.5	507	3.5	0	OUTLET	100
SL8	JS4.2	2.5	491	3.3	0	OUTLET	100
SL9	JS4.3	0.7	349	1.36	0	OUTLET	100
SL10	JS4.3	0.5	222	0.83	0	OUTLET	100

SL11	JT3.1	0.7	192	2.5	0	OUTLET	100
SL12	JT3.1	0.6	176	2	0	OUTLET	100
SL13	JT3.2	0.8	239	4.21	0	OUTLET	100
SL14	JT3.2	3.4	307	3	0	OUTLET	100
SL15	JT4	0.6	221	2.5	0	OUTLET	100
SL16	JT4	0.8	225	3.3	0	OUTLET	100
SL17	JT3.2	1.2	390	3.25	0	OUTLET	100
SL18	JT3.2	0.7	237	3.5	0	OUTLET	100
SL19	JS4.3	7.6	691	2.89	0	OUTLET	100
SL20	JS4.3	2.3	537	2.07	0	OUTLET	100
SL21	JS4.4	11.9	795	2.08	20	PERVIOUS	10
SL22	JS4.4	1.5	203	2.29	25	PERVIOUS	10
SL23	JGL1.1	1.2	235	2.29	35	PERVIOUS	10
SL24	JGL1.1	5.5	415	2.29	70	PERVIOUS	10
SL25	JS4.5	6.1	768	2.08	30	PERVIOUS	10
SL26	JS4.5	3.5	382	2.29	80	PERVIOUS	10
SL27	JGL2.1	4.1	378	2.29	65	PERVIOUS	10
SL28	JGL2.1	2.1	342	2.29	50	PERVIOUS	10
SL29	JGL2.2	1	174	2.29	100	PERVIOUS	10
SL30	JGL2.2	0.7	247	2.29	75	PERVIOUS	10
SL31	JS4.5	2.1	375	2.29	90	PERVIOUS	10
SL32	JS4.6	5.8	737	2.08	30	PERVIOUS	10
SL33	JS4.6	3.4	428	2.29	35	PERVIOUS	10
SL34	JGL3.1	4.3	420	1.87	100	PERVIOUS	10
SL35	JGL3.2	3.2	365	2.29	85	PERVIOUS	10
SL36	JGL3.2	0.6	174	2.29	95	PERVIOUS	10
SL37	JGL3.3	3.1	339	2.29	95	PERVIOUS	10
SL38	JGL3.3	5.9	699	2.01	90	PERVIOUS	10
SL39	JGL3.4	0.7	163	2.29	100	PERVIOUS	10
SL40	JGL3.5	0.3	125	2.29	85	PERVIOUS	10
SL41	JGL3.5	0.5	138	2.29	0	OUTLET	100
SL42	JGL3.6	2	302	2.29	90	PERVIOUS	10
SL43	JGL3.6	0.8	234	2.29	90	PERVIOUS	10
SL44	JGL3.7	1.1	258	2.29	90	PERVIOUS	10
SL45	JGL3.7	0.9	177	2.29	100	PERVIOUS	10
SL46	JGL3.8	1.6	390	2.29	100	PERVIOUS	10
SL47	JGL3.8	0.8	313	2.29	100	PERVIOUS	10
SL48	JGL3.9	0.5	152	2.29	75	PERVIOUS	10
SL49	JGL3.9	0.8	179	2.29	90	PERVIOUS	10
SL50	JS4.7	1.4	303	2.08	0	OUTLET	100
SL51	JS4.7	3.3	328	2.29	20	PERVIOUS	10
SL52	JGL4.1	0.8	348	2.08	55	PERVIOUS	10
SL53	JS4.8	7.4	802	2.08	90	PERVIOUS	10
SL54	JS4.8	4.1	396	2.29	60	PERVIOUS	10
SL55	JGL5.1	1.2	431	2.08	30	PERVIOUS	10
SL56	JS4.9	2.1	667	2.08	25	PERVIOUS	10
SL57	JS4.9	1.6	392	2.29	65	PERVIOUS	10
SL58	JGL6.1	1.3	279	2.29	90	PERVIOUS	10
SL59	JGL6.1	0.8	230	2.29	90	PERVIOUS	10
SL60	JGL6.2	1.3	301	2.29	85	PERVIOUS	10
SL61	JS4.10	2.5	504	2.08	75	PERVIOUS	10
SL62	JS4.10	1.6	207	2.29	55	PERVIOUS	10
SL63	JGL7.1	0.6	153	2.29	100	PERVIOUS	10
SL64	JS4.11	0.7	353	2.08	80	PERVIOUS	10
SL65	JS4.11	0.4	235	2.29	45	PERVIOUS	10
SL66	JGL8.1	4.9	711	2.08	70	PERVIOUS	10
SL67	JS4.12	1.3	339	2.08	75	PERVIOUS	10
SL68	JS4.12	0.7	149	2.29	55	PERVIOUS	10
SL69	JGL9.1	2.1	559	2.08	65	PERVIOUS	10
SL70	JS4.13	0.9	326	2.08	80	PERVIOUS	10
SL71	JS4.13	0.4	125	2.29	55	PERVIOUS	10
SL72	JGL10.1	1.4	473	2.08	35	PERVIOUS	10

SL73	JP35	1.9	421	2.08	65	PERVIOUS	10
SL74	JP35	0.7	200	2.29	0	OUTLET	100
SL75	JGL11.1	0.3	145	2.29	75	PERVIOUS	10
SL76	JP35	0.1	119	2.29	0	OUTLET	100

Node Summary

Name	X-Coordinate	Y-Coordinate	Invert El. (m)	Max. Depth (m)
JP1	206682	7560461	898.84	0.99
JS1	206892	7560603	911.56	0.99
JP2	206604	7560590	895.04	0.78
JS2.1	205724	7562213	887.77	0.9
JT1	205955	7561544	893.9	0.9
JS2.2	205798	7561507	870.66	0.9
JP3	205115	7560828	856.78	1.85
JGG1.1	204563	7560403	886.03	0.6
JGG1.2	204712	7560597	865.85	0.6
JP4	204675	7560759	851.12	1.85
JGG2.1	204740	7560977	879.95	0.45
JP5	204641	7560751	850.63	1.85
JGG3.1	204624	7560985	874.44	0.45
JP6	204574	7560750	849.89	1.85
JGG4.1	204566	7560994	874.18	0.45
JP7	204514	7560762	849.15	1.85
JGG5.1	204505	7561004	871.53	0.45
JP8	204451	7560788	848.41	1.85
JGG6.1	204479	7561239	892.71	0.15
JGG6.2	204444	7561013	870.79	0.45
JP9	204390	7560799	847.67	1.85
JGG7.1	204241	7560375	880.29	0.15
JGG7.2	204259	7560472	872.95	0.3
JGG7.3	204293	7560587	862.67	0.3
JP10	204290	7560798	846.44	1.85
JGG8.1	204266	7560681	854.75	0.6
JP11	204281	7560797	846.26	1.85
JGG9.1	204383	7561021	876.52	0.45
JP12	204250	7560792	845.77	1.85
JGG10.1	204176	7560710	851.4	0.45
JGG11.1	204193	7560851	850.4	0.45
JP13	204187	7560795	844.91	1.85
JGG12.1	204016	7560731	858.98	0.45
JGG13.1	204130	7560860	848.11	0.45
JP14	204123	7560820	844.05	1.85
JGG14.1	204070	7560870	846.78	0.45
JP15	204061	7560836	843.19	1.85
JGG15.1	203886	7560478	864.34	0.45
JGG15.2	203872	7560626	853.53	0.45
JP16	203938	7560939	840.6	1.85
JGG16.1	203439	7560284	925.87	0.15
JGG16.2	203576	7560555	903.11	0.45
JGG16.3	203442	7560821	878.52	0.45
JGG16.4	203598	7560886	865.31	0.45
JGG16.5	203793	7560934	853.57	0.45
JGG17.1	203945	7560994	845.81	0.45
JP17	203901	7561006	839.37	1.85
JGG18.1	203842	7561030	842.55	0.45
JP18	203890	7561045	838.63	1.85
JGG19.1	203788	7561173	840.09	0.45

JGG20.1	203841	7561205	838.33	0.45
JP19	203821	7561200	836.17	1.85
JGG21.1	203597	7561057	857.08	0.45
JGG21.2	203604	7561258	842.4	0.45
JP20	203626	7561367	833.71	1.85
JGG22.1	203509	7561418	836.31	0.45
JS3.1	205124	7562427	919.63	1.55
JGI1.1	204629	7562397	955.76	0.3
JGI1.2	204834	7562368	930.14	0.3
JS3.2	204957	7562284	908.11	1.55
JGI2.1	203630	7561491	838.42	0.3
JS3.3	203579	7561501	834	1.55
JP21	203535	7561454	830.86	2
JGG23.1	203399	7561437	833.59	0.45
JGG24.1	203438	7561493	834.43	0.45
JP22	203426	7561462	830.08	2
JGG25.1	203331	7561444	835.51	0.45
JGG26.1	203386	7561506	835.14	0.45
JP23	203356	7561477	829.58	2
JGG27.1	203326	7561520	833.58	0.45
JP24	203311	7561490	829.23	1.72
JGG28.1	203263	7561536	832.54	0.45
JP25	203254	7561507	828.8	1.72
JGG29.1	203045	7561260	864.98	0.45
JGG29.2	203104	7561443	846.57	0.45
JP26	203216	7561519	828.52	1.72
JGG30.1	203204	7561553	832.12	0.45
JP27	203196	7561526	828.38	1.72
JGG31.1	203198	7561695	862.02	0.3
JGG31.2	203279	7561587	852.96	0.15
JGG31.3	203173	7561625	839.68	0.3
JP28	203129	7561545	827.88	1.72
JGG32.1	203134	7561678	843.09	0.3
JP29	203104	7561555	827.67	1.72
JGG33.1	202974	7561186	865.91	0.45
JP30	203025	7561582	827.03	1.72
JGG34.1	203105	7561638	833.1	0.3
JP31	202997	7561592	826.74	1.72
JGG35.1	202941	7561440	842.77	0.3
JP32	202966	7561604	826.46	1.72
JGG36.1	202939	7561638	830.14	0.3
JP33	202939	7561614	826.2	1.72
JGG37.1	202893	7561638	836.88	0.3
JGG37.2	202814	7561663	827.02	0.3
JP34	202810	7561654	825.49	1.72
JGG38.1	202740	7561478	842.48	0.45
JGG38.2	202734	7561585	833.83	0.45
JS4.1	204140	7562938	888.48	1.65
JT2	204162	7562698	877.39	1.65
JS4.2	203910	7562630	860.97	1.65
JT3.1	203781	7563084	890.97	1.65
JT4	203865	7563066	885.8	1.65
JT3.2	203813	7562897	873.97	1.65
JS4.3	203819	7562558	852.97	1.65
JGL1.1	203710	7562617	868.96	0.45
JS4.4	203728	7562457	849.46	1.65
JGL2.1	203421	7562563	891.22	0.15
JGL2.2	203425	7562404	872.92	0.3
JS4.5	203640	7562384	846.93	1.65
JGL3.1	202803	7562550	999.74	0.45
JGL3.2	203008	7562533	951.69	0.45
JGL3.3	203112	7562398	924.81	0.45

JGL3.4	203066	7562347	916.8	0.45
JGL3.5	203172	7562364	904.22	0.45
JGL3.6	203209	7562562	899.07	0.45
JGL3.7	203215	7562371	877.33	0.45
JGL3.8	203310	7562471	865.89	0.45
JGL3.9	203312	7562387	856.17	0.45
JS4.6	203318	7562250	840.1	1.65
JGL4.1	203488	7562185	868.2	0.45
JS4.7	203209	7562207	837.41	1.65
JGL5.1	203216	7562050	857.07	0.3
JS4.8	203044	7562098	833.9	1.65
JGL6.1	202815	7562033	857.38	0.45
JGL6.2	203010	7562038	833.92	0.45
JS4.9	203010	7562027	832.73	1.65
JGL7.1	202820	7561929	843.04	0.3
JS4.10	202917	7561930	830.78	1.65
JGL8.1	202925	7561898	834.62	0.3
JS4.11	202890	7561911	830.2	1.65
JGL9.1	202896	7561835	834.19	0.45
JS4.12	202848	7561851	828.93	1.65
JGL10.1	202855	7561786	832.69	0.45
JS4.13	202814	7561808	827.95	1.65
JGL11.1	202723	7561721	829.79	0.3
JP35	202708	7561694	825.12	2.07
JGG39.1	202650	7561404	878.49	0.45
JGG39.2	202545	7561510	856.65	0.15
JGG39.3	202433	7561612	848	0.15
JGG39.4	202541	7561617	838.52	0.45
JGG39.5	202630	7561664	829.87	0.45
JGG40.1	202624	7561839	833.04	0.45
JP36	202627	7561736	823.22	2.07
JGG41.1	202503	7562428	904.32	0.45
JGG41.2	202510	7562218	883.29	0.45
JGG41.3	202647	7562024	864.59	0.45
JGG41.4	202516	7562017	852.43	0.45
JGG41.5	202717	7561927	843.55	0.45
JGG41.6	202518	7561921	823.91	0.45
JP37	202519	7561888	820.17	2.07
JGG42.1	202429	7562013	822.55	0.75
JP38	202364	7562010	816.87	2.07
JGG43.1	202305	7562321	844.15	0.45
JGG43.2	202312	7562163	829.19	0.45
JP39	202317	7562028	816.1	2.07

Conduit Summary

Name	Inlet Node	Outlet Node	Length (m)	Roughness	Outlet Offset (m)	Slope of conduit (m/m)
CP1	JP1	JP2	165	0.1	0	0.023
CP2	JP2	JP3	1410	0.1	0	0.027
CP3	JP3	JP4	460	0.05	0	0.012
CP4	JP4	JP5	40	0.05	0	0.012
CP5	JP5	JP6	60	0.05	0	0.012
CP6	JP6	JP7	60	0.05	0	0.012
CP7	JP7	JP8	60	0.05	0	0.012
CP8	JP8	JP9	60	0.05	0	0.012
CP9	JP9	JP10	100	0.05	0	0.012
CP10	JP10	JP11	15	0.05	0	0.012
CP11	JP11	JP12	40	0.05	0	0.012

CP12	JP12	JP13	70	0.05	0	0.012
CP13	JP13	JP14	70	0.05	0	0.012
CP14	JP14	JP15	70	0.05	0	0.012
CP15	JP15	JP16	210	0.05	0	0.012
CP16	JP16	JP17	100	0.05	0	0.012
CP17	JP17	JP18	60	0.05	0	0.012
CP18	JP18	JP19	200	0.05	0	0.012
CP19	JP19	JP20	200	0.05	0	0.012
CP20	JP20	JP21	150	0.05	0	0.019
CP21	JP21	JP22	110	0.045	0	0.007
CP22	JP22	JP23	70	0.045	0	0.007
CP23	JP23	JP24	50	0.045	0	0.007
CP24	JP24	JP25	60	0.045	0	0.007
CP25	JP25	JP26	40	0.045	0	0.007
CP26	JP26	JP27	20	0.045	0	0.007
CP27	JP27	JP28	70	0.045	0	0.007
CP28	JP28	JP29	30	0.045	0	0.007
CP29	JP29	JP30	90	0.045	0	0.007
CP30	JP30	JP31	40	0.045	0	0.007
CP31	JP31	JP32	40	0.045	0	0.007
CP32	JP32	JP33	36	0.045	0	0.007
CP33	JP33	JP34	100	0.045	0	0.007
CP34	JP34	JP35	70	0.045	0	0.005
CP35	JP35	JP36	75	0.045	0	0.025
CP36	JP36	JP37	120	0.045	0	0.025
CP37	JP37	JP38	130	0.045	0	0.025
CP38	JP38	JP39	30	0.045	0	0.026
CP39	JP39	Out1	70	0.045	0	0.040
CS1	JS1	JP2	290	0.1	0	0.057
CS2.1	JS2.1	JS2.2	580	0.1	0	0.030
CT1	JT1	JS2.2	400	0.1	0	0.058
CS2.2	JS2.2	JP3	980	0.1	0	0.014
CS3.1	JS3.1	JS3.2	300	0.08	0	0.038
CS3.2	JS3.2	JS3.3	1930	0.08	0	0.038
CS3.3	JS3.3	JP21	80	0.08	0	0.039
CS4.1	JS4.1	JS4.2	340	0.045	0	0.081
CT2	JT2	JS4.2	270	0.045	0	0.061
CS4.2	JS4.2	JS4.3	210	0.045	0	0.038
CT3.1	JT3.1	JT3.2	200	0.045	0	0.085
CT4	JT4	JT3.2	180	0.045	0	0.066
CT3.2	JT3.2	JS4.3	400	0.045	0	0.053
CS4.3	JS4.3	JS4.4	180	0.045	0	0.020
CS4.4	JS4.4	JS4.5	130	0.045	0	0.019
CS4.5	JS4.5	JS4.6	350	0.045	0	0.020
CS4.6	JS4.6	JS4.7	138	0.045	0	0.019
CS4.7	JS4.7	JS4.8	180	0.045	0	0.020
CS4.8	JS4.8	JS4.9	60	0.045	0	0.020
CS4.9	JS4.9	JS4.10	100	0.045	0	0.020
CS4.10	JS4.10	JS4.11	30	0.045	0	0.019
CS4.11	JS4.11	JS4.12	65	0.045	0	0.020
CS4.12	JS4.12	JS4.13	50	0.045	0	0.020
CS4.13	JS4.13	JP35	145	0.045	0	0.020
CG1.1	JGG1.1	JGG1.2	275	0.013	0	0.073
CG1.2	JGG1.2	JP4	200	0.013	0.05	0.073
CG2.1	JGG2.1	JP5	305	0.013	0.25	0.095
CG3.1	JGG3.1	JP6	255	0.013	0.25	0.095
CG4.1	JGG4.1	JP7	260	0.013	0.25	0.095
CG5.1	JGG5.1	JP8	240	0.013	0.25	0.095
CGJ6.1	JGG6.1	JGG6.2	230	0.013	0	0.095
CG6.2	JGG6.2	JP9	240	0.013	0.25	0.095
CGJ7.1	JGG7.1	JGG7.2	100	0.013	0	0.073
CG7.2	JGG7.2	JGG7.3	140	0.013	0	0.073
CG7.3	JGG7.3	JP10	215	0.013	0.45	0.073
CG8.1	JGG8.1	JP11	115	0.013	0.05	0.073

CG9.1	JGG9.1	JP12	320	0.013	0.25	0.095
CG10.1	JGG10.1	JP13	85	0.013	0.25	0.073
CG11.1	JGG11.1	JP13	55	0.013	0.25	0.095
CG12.1	JGG12.1	JP14	200	0.013	0.25	0.073
CG13.1	JGG13.1	JP14	40	0.013	0.25	0.095
CG14.1	JGG14.1	JP15	35	0.013	0.25	0.095
CG15.1	JGG15.1	JGG15.2	120	0.013	0	0.090
CG15.2	JGG15.2	JP16	200	0.013	0.25	0.063
CGJ16.1	JGG16.1	JGG16.2	310	0.013	0	0.073
CG16.2	JGG16.2	JGG16.4	335	0.013	0	0.113
CG16.3	JGG16.3	JGG16.4	180	0.013	0	0.073
CG16.4	JGG16.4	JGG16.5	160	0.013	0	0.073
CG16.5	JGG16.5	JP17	190	0.013	0.25	0.073
CG17.1	JGG17.1	JP17	65	0.013	0.25	0.095
CG18.1	JGG18.1	JP18	50	0.013	0.25	0.073
CG19.1	JGG19.1	JP19	50	0.013	0.25	0.073
CG20.1	JGG20.1	JP19	20	0.013	0.25	0.096
CG21.1	JGG21.1	JGG21.2	200	0.013	0	0.073
CG21.2	JGG21.2	JP20	115	0.013	0.25	0.073
CG22.1	JGG22.1	JP21	55	0.013	0.12	0.097
CI1.1	JGI1.1	JGI1.2	205	0.013	0	0.125
CI1.2	JGI1.2	JS3.2	175	0.013	0.15	0.125
CI2.1	JGI2.1	JS3.3	40	0.013	0.15	0.107
CG23.1	JGG23.1	JP22	35	0.013	0.12	0.097
CG24.1	JGG24.1	JP22	35	0.013	0.12	0.121
CG25.1	JGG25.1	JP23	60	0.013	0.12	0.097
CG26.1	JGG26.1	JP23	45	0.013	0.12	0.121
CG27.1	JGG27.1	JP24	35	0.013	0.12	0.121
CG28.1	JGG28.1	JP25	30	0.013	0.12	0.121
CG29.1	JGG29.1	JGG29.2	190	0.013	0	0.097
CG29.2	JGG29.2	JP26	185	0.013	0.12	0.097
CG30.1	JGG30.1	JP27	30	0.013	0.12	0.121
CG31.1	JGG31.1	JGG31.3	75	0.013	0	0.298
CGJ31.2	JGG31.2	JGG31.3	110	0.013	0	0.121
CG31.3	JGG31.3	JP28	95	0.013	0.32	0.121
CG32.1	JGG32.1	JP29	125	0.013	0.32	0.121
CG33.1	JGG33.1	JP30	400	0.013	0.12	0.097
CG34.1	JGG34.1	JP31	50	0.013	0.32	0.121
CG35.1	JGG35.1	JP32	165	0.013	0.32	0.097
CG36.1	JGG36.1	JP33	30	0.013	0.32	0.121
CG37.1	JGG37.1	JGG37.2	80	0.013	0	0.123
CG37.2	JGG37.2	JP34	10	0.013	0.32	0.121
CG38.1	JGG38.1	JGG38.2	105	0.013	0	0.082
CG38.2	JGG38.2	JP35	100	0.013	0.47	0.082
CL1.1	JGL1.1	JS4.4	170	0.013	0.05	0.114
CLJ2.1	JGL2.1	JGL2.2	160	0.013	0	0.114
CL2.2	JGL2.2	JS4.5	225	0.013	0.25	0.114
CL3.1	JGL3.1	JGL3.3	420	0.013	0	0.178
CL3.2	JGL3.2	JGL3.3	235	0.013	0	0.114
CL3.3	JGL3.3	JGL3.5	70	0.013	0	0.294
CL3.4	JGL3.4	JGL3.5	110	0.013	0	0.114
CL3.5	JGL3.5	JGL3.7	45	0.013	0	0.598
CL3.6	JGL3.6	JGL3.7	190	0.013	0	0.114
CL3.7	JGL3.7	JGL3.9	100	0.013	0	0.212
CL3.8	JGL3.8	JGL3.9	85	0.013	0	0.114
CL3.9	JGL3.9	JS4.6	140	0.013	0.05	0.114
CL4.1	JGL4.1	JS4.7	295	0.013	0.05	0.104
CL5.1	JGL5.1	JS4.8	220	0.013	0.25	0.104
CL6.1	JGL6.1	JGL6.2	205	0.013	0	0.114
CL6.2	JGL6.2	JS4.9	10	0.013	0.05	0.114
CL7.1	JGL7.1	JS4.10	105	0.013	0.25	0.114
CL8.1	JGL8.1	JS4.11	40	0.013	0.25	0.104
CL9.1	JGL9.1	JS4.12	50	0.013	0.05	0.104
CL10.1	JGL10.1	JS4.13	45	0.013	0.25	0.100

CL11.1	JGL11.1	JP35	35	0.013	0.67	0.114
CG39.1	JGG39.1	JGG39.5	265	0.013	0	0.183
CGJ39.2	JGG39.2	JGG39.4	105	0.013	0	0.173
CGJ39.3	JGG39.3	JGG39.4	115	0.013	0	0.082
CG39.4	JGG39.4	JGG39.5	105	0.013	0	0.082
CG39.5	JGG39.5	JP36	75	0.013	0.47	0.082
CG40.1	JGG40.1	JP36	100	0.013	0.47	0.094
CG41.1	JGG41.1	JGG41.2	225	0.013	0	0.093
CG41.2	JGG41.2	JGG41.4	200	0.013	0	0.154
CG41.3	JGG41.3	JGG41.4	130	0.013	0	0.094
CG41.4	JGG41.4	JGG41.6	95	0.013	0	0.300
CG41.5	JGG41.5	JGG41.6	210	0.013	0	0.094
CG41.6	JGG41.6	JP37	35	0.013	0.47	0.093
CG42.1	JGG42.1	JP38	60	0.013	0.07	0.094
CG43.1	JGG43.1	JGG43.2	160	0.013	0	0.094
CG43.2	JGG43.2	JP39	135	0.013	0.47	0.093

Name	Cross-Section	Geom1 (m)	Geom2 (m)
CP1	IRREGULAR	0	0
CP2	IRREGULAR	0	0
CP3	IRREGULAR	0	0
CP4	IRREGULAR	0	0
CP5	IRREGULAR	0	0
CP6	IRREGULAR	0	0
CP7	IRREGULAR	0	0
CP8	IRREGULAR	0	0
CP9	IRREGULAR	0	0
CP10	IRREGULAR	0	0
CP11	IRREGULAR	0	0
CP12	IRREGULAR	0	0
CP13	IRREGULAR	0	0
CP14	IRREGULAR	0	0
CP15	IRREGULAR	0	0
CP16	IRREGULAR	0	0
CP17	IRREGULAR	0	0
CP18	IRREGULAR	0	0
CP19	IRREGULAR	0	0
CP20	IRREGULAR	0	0
CP21	IRREGULAR	0	0
CP22	IRREGULAR	0	0
CP23	IRREGULAR	0	0
CP24	IRREGULAR	0	0
CP25	IRREGULAR	0	0
CP26	IRREGULAR	0	0
CP27	IRREGULAR	0	0
CP28	IRREGULAR	0	0
CP29	IRREGULAR	0	0
CP30	IRREGULAR	0	0
CP31	IRREGULAR	0	0
CP32	IRREGULAR	0	0
CP33	IRREGULAR	0	0
CP34	IRREGULAR	0	0
CP35	IRREGULAR	0	0
CP36	IRREGULAR	0	0
CP37	IRREGULAR	0	0
CP38	IRREGULAR	0	0
CP39	IRREGULAR	0	0
CS1	IRREGULAR	0	0
CS2.1	IRREGULAR	0	0
CT1	IRREGULAR	0	0
CS2.2	IRREGULAR	0	0

CS3.1	IRREGULAR	0	0
CS3.2	IRREGULAR	0	0
CS3.3	IRREGULAR	0	0
CS4.1	IRREGULAR	0	0
CT2	IRREGULAR	0	0
CS4.2	IRREGULAR	0	0
CT3.1	IRREGULAR	0	0
CT4	IRREGULAR	0	0
CT3.2	IRREGULAR	0	0
CS4.3	IRREGULAR	0	0
CS4.4	IRREGULAR	0	0
CS4.5	IRREGULAR	0	0
CS4.6	IRREGULAR	0	0
CS4.7	IRREGULAR	0	0
CS4.8	IRREGULAR	0	0
CS4.9	IRREGULAR	0	0
CS4.10	IRREGULAR	0	0
CS4.11	IRREGULAR	0	0
CS4.12	IRREGULAR	0	0
CS4.13	IRREGULAR	0	0
CG1.1	CIRCULAR	0.8	0
CG1.2	CIRCULAR	0.8	0
CG2.1	CIRCULAR	0.6	0
CG3.1	CIRCULAR	0.6	0
CG4.1	CIRCULAR	0.6	0
CG5.1	CIRCULAR	0.6	0
CGJ6.1	TRIANGULAR	0.15	7.5
CG6.2	CIRCULAR	0.6	0
CGJ7.1	TRIANGULAR	0.15	7.5
CG7.2	CIRCULAR	0.4	0
CG7.3	CIRCULAR	0.4	0
CG8.1	CIRCULAR	0.8	0
CG9.1	CIRCULAR	0.6	0
CG10.1	CIRCULAR	0.6	0
CG11.1	CIRCULAR	0.6	0
CG12.1	CIRCULAR	0.6	0
CG13.1	CIRCULAR	0.6	0
CG14.1	CIRCULAR	0.6	0
CG15.1	CIRCULAR	0.6	0
CG15.2	CIRCULAR	0.6	0
CGJ16.1	TRIANGULAR	0.15	7.5
CG16.2	CIRCULAR	0.6	0
CG16.3	CIRCULAR	0.6	0
CG16.4	CIRCULAR	0.6	0
CG16.5	CIRCULAR	0.6	0
CG17.1	CIRCULAR	0.6	0
CG18.1	CIRCULAR	0.6	0
CG19.1	CIRCULAR	0.6	0
CG20.1	CIRCULAR	0.6	0
CG21.1	CIRCULAR	0.6	0
CG21.2	CIRCULAR	0.6	0
CG22.1	CIRCULAR	0.6	0
CI1.1	CIRCULAR	0.4	0
CI1.2	CIRCULAR	0.4	0
CI2.1	CIRCULAR	0.4	0
CG23.1	CIRCULAR	0.6	0
CG24.1	CIRCULAR	0.6	0
CG25.1	CIRCULAR	0.6	0
CG26.1	CIRCULAR	0.6	0
CG27.1	CIRCULAR	0.6	0
CG28.1	CIRCULAR	0.6	0
CG29.1	CIRCULAR	0.6	0

CG29.2	CIRCULAR	0.6	0
CG30.1	CIRCULAR	0.6	0
CG31.1	CIRCULAR	0.4	0
CGJ31.2	TRIANGULAR	0.15	7.5
CG31.3	CIRCULAR	0.4	0
CG32.1	CIRCULAR	0.4	0
CG33.1	CIRCULAR	0.6	0
CG34.1	CIRCULAR	0.4	0
CG35.1	CIRCULAR	0.4	0
CG36.1	CIRCULAR	0.4	0
CG37.1	CIRCULAR	0.4	0
CG37.2	CIRCULAR	0.4	0
CG38.1	CIRCULAR	0.6	0
CG38.2	CIRCULAR	0.6	0
CL1.1	CIRCULAR	0.6	0
CLJ2.1	TRIANGULAR	0.15	7.5
CL2.2	CIRCULAR	0.4	0
CL3.1	CIRCULAR	0.6	0
CL3.2	CIRCULAR	0.6	0
CL3.3	CIRCULAR	0.6	0
CL3.4	CIRCULAR	0.6	0
CL3.5	CIRCULAR	0.6	0
CL3.6	CIRCULAR	0.6	0
CL3.7	CIRCULAR	0.6	0
CL3.8	CIRCULAR	0.6	0
CL3.9	CIRCULAR	0.6	0
CL4.1	CIRCULAR	0.6	0
CL5.1	CIRCULAR	0.4	0
CL6.1	CIRCULAR	0.6	0
CL6.2	CIRCULAR	0.6	0
CL7.1	CIRCULAR	0.4	0
CL8.1	CIRCULAR	0.4	0
CL9.1	CIRCULAR	0.6	0
CL10.1	CIRCULAR	0.6	0
CL11.1	CIRCULAR	0.4	0
CG39.1	CIRCULAR	0.6	0
CGJ39.2	TRIANGULAR	0.15	7.5
CGJ39.3	TRIANGULAR	0.15	7.5
CG39.4	CIRCULAR	0.6	0
CG39.5	CIRCULAR	0.6	0
CG40.1	CIRCULAR	0.6	0
CG41.1	CIRCULAR	0.6	0
CG41.2	CIRCULAR	0.6	0
CG41.3	CIRCULAR	0.6	0
CG41.4	CIRCULAR	0.6	0
CG41.5	CIRCULAR	0.6	0
CG41.6	CIRCULAR	0.6	0
CG42.1	CIRCULAR	1	0
CG43.1	CIRCULAR	0.6	0
CG43.2	CIRCULAR	0.6	0

Base Flow Summary

Name	Evento 2		Evento 7		Evento 12	
	Initial Depth (m)	Baseline (CMS)	Initial Depth (m)	Baseline (m³/s)	Initial Depth (m)	Baseline (CMS)
JP1	0.37	0.07	0.35	0.05	0.34	0.04
JS1	0.34	0.05	0.33	0.04	0.32	0.03

JP2	0.37	0.04	0.34	0.03	0.33	0.03
JS2.1	0.11	0	0.11	0	0.11	0
JT1	0.13	0.02	0.12	0.01	0.12	0.01
JS2.2	0.33	0.15	0.29	0.11	0.27	0.09
JP3	0.7	0.45	0.63	0.34	0.59	0.27
JGG1.1	0	0	0	0	0	0
JGG1.2	0	0	0	0	0	0
JP4	0.74	0.12	0.66	0.09	0.62	0.07
JGG2.1	0	0	0	0	0	0
JP5	0.76	0.05	0.68	0.04	0.63	0.03
JGG3.1	0	0	0	0	0	0
JP6	0.77	0.02	0.69	0.01	0.63	0.01
JGG4.1	0	0	0	0	0	0
JP7	0.77	0.01	0.69	0.01	0.64	0.01
JGG5.1	0	0	0	0	0	0
JP8	0.77	0.01	0.69	0.01	0.64	0.01
JGG6.1	0	0	0	0	0	0
JGG6.2	0	0	0	0	0	0
JP9	0.78	0.04	0.7	0.03	0.65	0.02
JGG7.1	0	0	0	0	0	0
JGG7.2	0	0	0	0	0	0
JGG7.3	0	0	0	0	0	0
JP10	0.81	0.09	0.72	0.07	0.67	0.06
JGG8.1	0	0	0	0	0	0
JP11	0.81	0	0.72	0	0.67	0
JGG9.1	0	0	0	0	0	0
JP12	0.81	0.01	0.73	0.01	0.68	0.01
JGG10.1	0	0	0	0	0	0
JGG11.1	0	0	0	0	0	0
JP13	0.82	0.02	0.73	0.01	0.68	0.01
JGG12.1	0	0	0	0	0	0
JGG13.1	0	0	0	0	0	0
JP14	0.82	0.01	0.73	0.01	0.68	0.01
JGG14.1	0	0	0	0	0	0
JP15	0.82	0.01	0.74	0.01	0.68	0
JGG15.1	0	0	0	0	0	0
JGG15.2	0	0	0	0	0	0
JP16	0.84	0.05	0.75	0.03	0.69	0.03
JGG16.1	0	0	0	0	0	0
JGG16.2	0	0	0	0	0	0
JGG16.3	0	0	0	0	0	0
JGG16.4	0	0	0	0	0	0
JGG16.5	0	0	0	0	0	0
JGG17.1	0	0	0	0	0	0
JP17	0.88	0.17	0.79	0.13	0.73	0.1
JGG18.1	0	0	0	0	0	0
JP18	0.88	0.01	0.79	0.01	0.73	0
JGG19.1	0	0	0	0	0	0
JGG20.1	0	0	0	0	0	0
JP19	0.89	0.04	0.8	0.03	0.74	0.03
JGG21.1	0	0	0	0	0	0
JGG21.2	0	0	0	0	0	0
JP20	0.92	0.1	0.82	0.08	0.76	0.06
JGG22.1	0	0	0	0	0	0

JS3.1	0.58	0	0.58	0	0.58	0
JGI1.1	0	0	0	0	0	0
JGI1.2	0	0	0	0	0	0
JS3.2	0.59	0.04	0.59	0.03	0.59	0.02
JGI2.1	0	0	0	0	0	0
JS3.3	0.65	0.28	0.63	0.21	0.63	0.17
JP21	0.68	0.06	0.59	0.05	0.53	0.04
JGG23.1	0	0	0	0	0	0
JGG24.1	0	0	0	0	0	0
JP22	0.68	0.01	0.59	0.01	0.53	0
JGG25.1	0	0	0	0	0	0
JGG26.1	0	0	0	0	0	0
JP23	0.68	0.01	0.59	0.01	0.53	0.01
JGG27.1	0	0	0	0	0	0
JP24	0.68	0.01	0.59	0.01	0.53	0
JGG28.1	0	0	0	0	0	0
JP25	0.68	0	0.59	0	0.54	0
JGG29.1	0	0	0	0	0	0
JGG29.2	0	0	0	0	0	0
JP26	0.68	0.01	0.59	0.01	0.54	0.01
JGG30.1	0	0	0	0	0	0
JP27	0.68	0	0.59	0	0.54	0
JGG31.1	0	0	0	0	0	0
JGG31.2	0	0	0	0	0	0
JGG31.3	0	0	0	0	0	0
JP28	0.69	0.02	0.6	0.01	0.54	0.01
JGG32.1	0	0	0	0	0	0
JP29	0.69	0	0.6	0	0.54	0
JGG33.1	0	0	0	0	0	0
JP30	0.69	0.02	0.6	0.01	0.54	0.01
JGG34.1	0	0	0	0	0	0
JP31	0.69	0.01	0.6	0.01	0.54	0
JGG35.1	0	0	0	0	0	0
JP32	0.69	0	0.6	0	0.55	0
JGG36.1	0	0	0	0	0	0
JP33	0.69	0	0.6	0	0.55	0
JGG37.1	0	0	0	0	0	0
JGG37.2	0	0	0	0	0	0
JP34	0.69	0.01	0.6	0	0.55	0
JGG38.1	0	0	0	0	0	0
JGG38.2	0	0	0	0	0	0
JS4.1	0.1	0	0.1	0	0.1	0
JT2	0.1	0	0.1	0	0.1	0
JS4.2	0.13	0.04	0.13	0.03	0.13	0.02
JT3.1	0.1	0	0.1	0	0.1	0
JT4	0.1	0	0.1	0	0.1	0
JT3.2	0.11	0.02	0.11	0.01	0.11	0.01
JS4.3	0.21	0.03	0.18	0.02	0.15	0.02
JGL1.1	0	0	0	0	0	0
JS4.4	0.25	0.05	0.21	0.04	0.2	0.03
JGL2.1	0	0	0	0	0	0
JGL2.2	0	0	0	0	0	0
JS4.5	0.29	0.05	0.25	0.04	0.23	0.03
JGL3.1	0	0	0	0	0	0

JGL3.2	0	0	0	0	0	0
JGL3.3	0	0	0	0	0	0
JGL3.4	0	0	0	0	0	0
JGL3.5	0	0	0	0	0	0
JGL3.6	0	0	0	0	0	0
JGL3.7	0	0	0	0	0	0
JGL3.8	0	0	0	0	0	0
JGL3.9	0	0	0	0	0	0
JS4.6	0.35	0.1	0.31	0.07	0.28	0.06
JGL4.1	0	0	0	0	0	0
JS4.7	0.37	0.01	0.31	0.01	0.29	0.01
JGL5.1	0	0	0	0	0	0
JS4.8	0.38	0.03	0.33	0.03	0.3	0.02
JGL6.1	0	0	0	0	0	0
JGL6.2	0	0	0	0	0	0
JS4.9	0.4	0.02	0.34	0.01	0.31	0.01
JGL7.1	0	0	0	0	0	0
JS4.10	0.4	0.01	0.35	0.01	0.31	0.01
JGL8.1	0	0	0	0	0	0
JS4.11	0.41	0.02	0.35	0.01	0.32	0.01
JGL9.1	0	0	0	0	0	0
JS4.12	0.42	0.01	0.36	0.01	0.32	0.01
JGL10.1	0	0	0	0	0	0
JS4.13	0.42	0.01	0.37	0.01	0.33	0
JGL11.1	0	0	0	0	0	0
JP35	0.43	0.08	0.38	0.06	0.36	0.05
JGG39.1	0	0	0	0	0	0
JGG39.2	0	0	0	0	0	0
JGG39.3	0	0	0	0	0	0
JGG39.4	0	0	0	0	0	0
JGG39.5	0	0	0	0	0	0
JGG40.1	0	0	0	0	0	0
JP36	0.43	0.07	0.39	0.05	0.36	0.04
JGG41.1	0	0	0	0	0	0
JGG41.2	0	0	0	0	0	0
JGG41.3	0	0	0	0	0	0
JGG41.4	0	0	0	0	0	0
JGG41.5	0	0	0	0	0	0
JGG41.6	0	0	0	0	0	0
JP37	0.44	0.1	0.39	0.08	0.37	0.06
JGG42.1	0	0	0	0	0	0
JP38	0.44	0.01	0.39	0.01	0.37	0.01
JGG43.1	0	0	0	0	0	0
JGG43.2	0	0	0	0	0	0
JP39	0.44	0.03	0.4	0.02	0.37	0.02

	Evento 24		Evento 27		Evento 49	
Name	Initial Depth (m)	Baseline (CMS)	Initial Depth (m)	Baseline (CMS)	Initial Depth (m)	Baseline (m³/s)
JP1	0.32	0.02	0.32	0.02	0.33	0.03
JS1	0.31	0.01	0.31	0.01	0.32	0.02
JP2	0.27	0.01	0.28	0.01	0.29	0.02
JS2.1	0.11	0	0.11	0	0.11	0
JT1	0.11	0	0.11	0	0.12	0.01
JS2.2	0.18	0.04	0.2	0.04	0.21	0.06

JP3	0.42	0.11	0.45	0.13	0.49	0.17
JGG1.1	0	0	0	0	0	0
JGG1.2	0	0	0	0	0	0
JP4	0.44	0.03	0.47	0.03	0.52	0.05
JGG2.1	0	0	0	0	0	0
JP5	0.45	0.01	0.48	0.02	0.53	0.02
JGG3.1	0	0	0	0	0	0
JP6	0.46	0	0.49	0.01	0.53	0.01
JGG4.1	0	0	0	0	0	0
JP7	0.46	0	0.49	0	0.54	0
JGG5.1	0	0	0	0	0	0
JP8	0.46	0	0.49	0	0.54	0
JGG6.1	0	0	0	0	0	0
JGG6.2	0	0	0	0	0	0
JP9	0.46	0.01	0.49	0.01	0.54	0.01
JGG7.1	0	0	0	0	0	0
JGG7.2	0	0	0	0	0	0
JGG7.3	0	0	0	0	0	0
JP10	0.47	0.02	0.51	0.03	0.56	0.03
JGG8.1	0	0	0	0	0	0
JP11	0.48	0	0.51	0	0.56	0
JGG9.1	0	0	0	0	0	0
JP12	0.48	0	0.51	0	0.56	0
JGG10.1	0	0	0	0	0	0
JGG11.1	0	0	0	0	0	0
JP13	0.48	0	0.51	0.01	0.56	0.01
JGG12.1	0	0	0	0	0	0
JGG13.1	0	0	0	0	0	0
JP14	0.48	0	0.51	0	0.57	0
JGG14.1	0	0	0	0	0	0
JP15	0.49	0	0.52	0	0.57	0
JGG15.1	0	0	0	0	0	0
JGG15.2	0	0	0	0	0	0
JP16	0.49	0.01	0.52	0.01	0.58	0.02
JGG16.1	0	0	0	0	0	0
JGG16.2	0	0	0	0	0	0
JGG16.3	0	0	0	0	0	0
JGG16.4	0	0	0	0	0	0
JGG16.5	0	0	0	0	0	0
JGG17.1	0	0	0	0	0	0
JP17	0.51	0.04	0.55	0.05	0.6	0.06
JGG18.1	0	0	0	0	0	0
JP18	0.51	0	0.55	0	0.6	0
JGG19.1	0	0	0	0	0	0
JGG20.1	0	0	0	0	0	0
JP19	0.52	0.01	0.55	0.01	0.61	0.02
JGG21.1	0	0	0	0	0	0
JGG21.2	0	0	0	0	0	0
JP20	0.53	0.02	0.57	0.03	0.63	0.04
JGG22.1	0	0	0	0	0	0
JS3.1	0.58	0	0.58	0	0.58	0
JG11.1	0	0	0	0	0	0
JG11.2	0	0	0	0	0	0
JS3.2	0.59	0.01	0.59	0.01	0.59	0.01
JG12.1	0	0	0	0	0	0
JS3.3	0.6	0.07	0.6	0.08	0.61	0.11

JP21	0.33	0.01	0.37	0.02	0.42	0.02
JGG23.1	0	0	0	0	0	0
JGG24.1	0	0	0	0	0	0
JP22	0.33	0	0.37	0	0.42	0
JGG25.1	0	0	0	0	0	0
JGG26.1	0	0	0	0	0	0
JP23	0.34	0	0.37	0	0.42	0
JGG27.1	0	0	0	0	0	0
JP24	0.34	0	0.37	0	0.42	0
JGG28.1	0	0	0	0	0	0
JP25	0.34	0	0.37	0	0.42	0
JGG29.1	0	0	0	0	0	0
JGG29.2	0	0	0	0	0	0
JP26	0.34	0	0.37	0	0.42	0.01
JGG30.1	0	0	0	0	0	0
JP27	0.34	0	0.37	0	0.42	0
JGG31.1	0	0	0	0	0	0
JGG31.2	0	0	0	0	0	0
JGG31.3	0	0	0	0	0	0
JP28	0.34	0	0.37	0	0.42	0.01
JGG32.1	0	0	0	0	0	0
JP29	0.34	0	0.37	0	0.42	0
JGG33.1	0	0	0	0	0	0
JP30	0.34	0	0.38	0	0.43	0.01
JGG34.1	0	0	0	0	0	0
JP31	0.34	0	0.38	0	0.43	0
JGG35.1	0	0	0	0	0	0
JP32	0.34	0	0.38	0	0.43	0
JGG36.1	0	0	0	0	0	0
JP33	0.34	0	0.38	0	0.43	0
JGG37.1	0	0	0	0	0	0
JGG37.2	0	0	0	0	0	0
JP34	0.34	0	0.38	0	0.43	0
JGG38.1	0	0	0	0	0	0
JGG38.2	0	0	0	0	0	0
JS4.1	0.1	0	0.1	0	0.1	0
JT2	0.1	0	0.1	0	0.1	0
JS4.2	0.11	0.01	0.11	0.01	0.12	0.01
JT3.1	0.1	0	0.1	0	0.1	0
JT4	0.1	0	0.1	0	0.1	0
JT3.2	0.11	0	0.11	0	0.11	0.01
JS4.3	0.12	0.01	0.14	0.01	0.15	0.01
JGL1.1	0	0	0	0	0	0
JS4.4	0.15	0.01	0.15	0.02	0.17	0.02
JGL2.1	0	0	0	0	0	0
JGL2.2	0	0	0	0	0	0
JS4.5	0.16	0.01	0.17	0.02	0.19	0.02
JGL3.1	0	0	0	0	0	0
JGL3.2	0	0	0	0	0	0
JGL3.3	0	0	0	0	0	0
JGL3.4	0	0	0	0	0	0
JGL3.5	0	0	0	0	0	0
JGL3.6	0	0	0	0	0	0
JGL3.7	0	0	0	0	0	0
JGL3.8	0	0	0	0	0	0
JGL3.9	0	0	0	0	0	0

JS4.6	0.18	0.02	0.2	0.03	0.21	0.04
JGL4.1	0	0	0	0	0	0
JS4.7	0.19	0	0.2	0	0.22	0.01
JGL5.1	0	0	0	0	0	0
JS4.8	0.19	0.01	0.21	0.01	0.23	0.01
JGL6.1	0	0	0	0	0	0
JGL6.2	0	0	0	0	0	0
JS4.9	0.2	0	0.21	0.01	0.24	0.01
JGL7.1	0	0	0	0	0	0
JS4.10	0.2	0	0.21	0	0.24	0
JGL8.1	0	0	0	0	0	0
JS4.11	0.2	0	0.22	0	0.25	0.01
JGL9.1	0	0	0	0	0	0
JS4.12	0.21	0	0.22	0	0.25	0
JGL10.1	0	0	0	0	0	0
JS4.13	0.21	0	0.22	0	0.26	0
JGL11.1	0	0	0	0	0	0
JP35	0.28	0.02	0.29	0.02	0.31	0.03
JGG39.1	0	0	0	0	0	0
JGG39.2	0	0	0	0	0	0
JGG39.3	0	0	0	0	0	0
JGG39.4	0	0	0	0	0	0
JGG39.5	0	0	0	0	0	0
JGG40.1	0	0	0	0	0	0
JP36	0.28	0.02	0.29	0.02	0.31	0.03
JGG41.1	0	0	0	0	0	0
JGG41.2	0	0	0	0	0	0
JGG41.3	0	0	0	0	0	0
JGG41.4	0	0	0	0	0	0
JGG41.5	0	0	0	0	0	0
JGG41.6	0	0	0	0	0	0
JP37	0.28	0.02	0.29	0.03	0.32	0.04
JGG42.1	0	0	0	0	0	0
JP38	0.28	0	0.3	0	0.32	0
JGG43.1	0	0	0	0	0	0
JGG43.2	0	0	0	0	0	0
JP39	0.28	0.01	0.3	0.01	0.32	0.01

Name	Evento 52		Evento 53	
	Initial Depth (m)	Baseline (CMS)	Initial Depth (m)	Baseline (CMS)
JP1	0.33	0.03	0.33	0.03
JS1	0.32	0.02	0.32	0.02
JP2	0.31	0.02	0.31	0.02
JS2.1	0.11	0	0.11	0
JT1	0.12	0.01	0.12	0.01
JS2.2	0.24	0.07	0.25	0.08
JP3	0.54	0.22	0.55	0.23
JGG1.1	0	0	0	0
JGG1.2	0	0	0	0
JP4	0.57	0.06	0.57	0.06
JGG2.1	0	0	0	0
JP5	0.58	0.03	0.59	0.03
JGG3.1	0	0	0	0
JP6	0.59	0.01	0.59	0.01

JGG4.1	0	0	0	0
JP7	0.59	0	0.59	0
JGG5.1	0	0	0	0
JP8	0.59	0.01	0.6	0.01
JGG6.1	0	0	0	0
JGG6.2	0	0	0	0
JP9	0.6	0.02	0.6	0.02
JGG7.1	0	0	0	0
JGG7.2	0	0	0	0
JGG7.3	0	0	0	0
JP10	0.62	0.05	0.63	0.05
JGG8.1	0	0	0	0
JP11	0.62	0	0.63	0
JGG9.1	0	0	0	0
JP12	0.62	0.01	0.63	0.01
JGG10.1	0	0	0	0
JGG11.1	0	0	0	0
JP13	0.63	0.01	0.63	0.01
JGG12.1	0	0	0	0
JGG13.1	0	0	0	0
JP14	0.63	0.01	0.63	0.01
JGG14.1	0	0	0	0
JP15	0.63	0	0.63	0
JGG15.1	0	0	0	0
JGG15.2	0	0	0	0
JP16	0.64	0.02	0.64	0.02
JGG16.1	0	0	0	0
JGG16.2	0	0	0	0
JGG16.3	0	0	0	0
JGG16.4	0	0	0	0
JGG16.5	0	0	0	0
JGG17.1	0	0	0	0
JP17	0.67	0.08	0.68	0.08
JGG18.1	0	0	0	0
JP18	0.67	0	0.68	0
JGG19.1	0	0	0	0
JGG20.1	0	0	0	0
JP19	0.68	0.02	0.68	0.02
JGG21.1	0	0	0	0
JGG21.2	0	0	0	0
JP20	0.69	0.05	0.7	0.05
JGG22.1	0	0	0	0
JS3.1	0.58	0	0.58	0
JGI1.1	0	0	0	0
JGI1.2	0	0	0	0
JS3.2	0.59	0.02	0.59	0.02
JGI2.1	0	0	0	0
JS3.3	0.62	0.14	0.62	0.14
JP21	0.48	0.03	0.48	0.03
JGG23.1	0	0	0	0
JGG24.1	0	0	0	0

JP22	0.48	0	0.48	0
JGG25.1	0	0	0	0
JGG26.1	0	0	0	0
JP23	0.48	0.01	0.49	0.01
JGG27.1	0	0	0	0
JP24	0.48	0	0.49	0
JGG28.1	0	0	0	0
JP25	0.48	0	0.49	0
JGG29.1	0	0	0	0
JGG29.2	0	0	0	0
JP26	0.48	0.01	0.49	0.01
JGG30.1	0	0	0	0
JP27	0.48	0	0.49	0
JGG31.1	0	0	0	0
JGG31.2	0	0	0	0
JGG31.3	0	0	0	0
JP28	0.48	0.01	0.49	0.01
JGG32.1	0	0	0	0
JP29	0.48	0	0.49	0
JGG33.1	0	0	0	0
JP30	0.49	0.01	0.49	0.01
JGG34.1	0	0	0	0
JP31	0.49	0	0.5	0
JGG35.1	0	0	0	0
JP32	0.49	0	0.5	0
JGG36.1	0	0	0	0
JP33	0.49	0	0.5	0
JGG37.1	0	0	0	0
JGG37.2	0	0	0	0
JP34	0.49	0	0.5	0
JGG38.1	0	0	0	0
JGG38.2	0	0	0	0
JS4.1	0.1	0	0.1	0
JT2	0.1	0	0.1	0
JS4.2	0.12	0.02	0.12	0.02
JT3.1	0.1	0	0.1	0
JT4	0.1	0	0.1	0
JT3.2	0.11	0.01	0.11	0.01
JS4.3	0.16	0.01	0.16	0.02
JGL1.1	0	0	0	0
JS4.4	0.18	0.03	0.19	0.03
JGL2.1	0	0	0	0
JGL2.2	0	0	0	0
JS4.5	0.21	0.03	0.21	0.03
JGL3.1	0	0	0	0
JGL3.2	0	0	0	0
JGL3.3	0	0	0	0
JGL3.4	0	0	0	0
JGL3.5	0	0	0	0
JGL3.6	0	0	0	0
JGL3.7	0	0	0	0

JGL3.8	0	0	0	0
JGL3.9	0	0	0	0
JS4.6	0.25	0.05	0.25	0.05
JGL4.1	0	0	0	0
JS4.7	0.26	0.01	0.26	0.01
JGL5.1	0	0	0	0
JS4.8	0.26	0.02	0.27	0.02
JGL6.1	0	0	0	0
JGL6.2	0	0	0	0
JS4.9	0.27	0.01	0.28	0.01
JGL7.1	0	0	0	0
JS4.10	0.28	0.01	0.28	0.01
JGL8.1	0	0	0	0
JS4.11	0.29	0.01	0.29	0.01
JGL9.1	0	0	0	0
JS4.12	0.29	0.01	0.29	0.01
JGL10.1	0	0	0	0
JS4.13	0.29	0	0.29	0
JGL11.1	0	0	0	0
JP35	0.33	0.04	0.34	0.04
JGG39.1	0	0	0	0
JGG39.2	0	0	0	0
JGG39.3	0	0	0	0
JGG39.4	0	0	0	0
JGG39.5	0	0	0	0
JGG40.1	0	0	0	0
JP36	0.34	0.04	0.34	0.04
JGG41.1	0	0	0	0
JGG41.2	0	0	0	0
JGG41.3	0	0	0	0
JGG41.4	0	0	0	0
JGG41.5	0	0	0	0
JGG41.6	0	0	0	0
JP37	0.34	0.05	0.34	0.05
JGG42.1	0	0	0	0
JP38	0.34	0.01	0.34	0.01
JGG43.1	0	0	0	0
JGG43.2	0	0	0	0
JP39	0.34	0.01	0.35	0.01

	Evento 2	Evento 7	Evento 12	Evento 24
Name	Initial Flow	Initial Flow	Initial Flow	Initial Flow
CP1	0.07	0.05	0.04	0.02
CP2	0.16	0.12	0.1	0.04
CP3	0.78	0.58	0.48	0.18
CP4	0.9	0.67	0.55	0.21
CP5	0.95	0.72	0.58	0.22
CP6	0.97	0.73	0.59	0.23
CP7	0.98	0.74	0.6	0.23
CP8	0.99	0.74	0.61	0.23
CP9	1.03	0.77	0.63	0.24
CP10	1.12	0.84	0.69	0.26

CP11	1.12	0.84	0.69	0.27
CP12	1.13	0.85	0.7	0.27
CP13	1.15	0.87	0.71	0.27
CP14	1.16	0.87	0.71	0.27
CP15	1.17	0.88	0.72	0.28
CP16	1.22	0.92	0.75	0.29
CP17	1.38	1.04	0.85	0.33
CP18	1.39	1.05	0.85	0.33
CP19	1.43	1.08	0.88	0.34
CP20	1.53	1.15	0.94	0.36
CP21	1.92	1.44	1.18	0.45
CP22	1.92	1.45	1.18	0.45
CP23	1.94	1.46	1.19	0.46
CP24	1.94	1.46	1.19	0.46
CP25	1.95	1.46	1.2	0.46
CP26	1.96	1.48	1.21	0.46
CP27	1.96	1.48	1.21	0.46
CP28	1.98	1.49	1.22	0.47
CP29	1.98	1.49	1.22	0.47
CP30	2	1.51	1.23	0.47
CP31	2.01	1.51	1.23	0.47
CP32	2.01	1.51	1.24	0.48
CP33	2.02	1.52	1.24	0.48
CP34	2.02	1.52	1.24	0.48
CP35	2.52	1.9	1.55	0.6
CP36	2.59	1.95	1.59	0.61
CP37	2.69	2.03	1.65	0.64
CP38	2.71	2.04	1.66	0.64
CP39	2.73	2.06	1.68	0.65
CS1	0.05	0.04	0.03	0.01
CS2.1	0	0	0	0
CT1	0.02	0.01	0.01	0
CS2.2	0.17	0.13	0.11	0.04
CS3.1	0	0	0	0
CS3.2	0.04	0.03	0.02	0.01
CS3.3	0.32	0.24	0.2	0.08
CS4.1	0	0	0	0
CT2	0	0	0	0
CS4.2	0.04	0.03	0.03	0.01
CT3.1	0	0	0	0
CT4	0	0	0	0
CT3.2	0.02	0.02	0.01	0.01
CS4.3	0.1	0.07	0.06	0.02
CS4.4	0.15	0.11	0.09	0.04
CS4.5	0.2	0.15	0.13	0.05
CS4.6	0.3	0.23	0.19	0.07
CS4.7	0.32	0.24	0.2	0.08
CS4.8	0.35	0.27	0.22	0.08
CS4.9	0.37	0.28	0.23	0.09
CS4.10	0.38	0.29	0.24	0.09
CS4.11	0.4	0.3	0.25	0.09
CS4.12	0.41	0.31	0.25	0.1
CS4.13	0.42	0.32	0.26	0.1
CG1.1	0	0	0	0
CG1.2	0	0	0	0
CG2.1	0	0	0	0

CG3.1	0	0	0	0
CG4.1	0	0	0	0
CG5.1	0	0	0	0
CGJ6.1	0	0	0	0
CG6.2	0	0	0	0
CGJ7.1	0	0	0	0
CG7.2	0	0	0	0
CG7.3	0	0	0	0
CG8.1	0	0	0	0
CG9.1	0	0	0	0
CG10.1	0	0	0	0
CG11.1	0	0	0	0
CG12.1	0	0	0	0
CG13.1	0	0	0	0
CG14.1	0	0	0	0
CG15.1	0	0	0	0
CG15.2	0	0	0	0
CGJ16.1	0	0	0	0
CG16.2	0	0	0	0
CG16.3	0	0	0	0
CG16.4	0	0	0	0
CG16.5	0	0	0	0
CG17.1	0	0	0	0
CG18.1	0	0	0	0
CG19.1	0	0	0	0
CG20.1	0	0	0	0
CG21.1	0	0	0	0
CG21.2	0	0	0	0
CG22.1	0	0	0	0
CI1.1	0	0	0	0
CI1.2	0	0	0	0
CI2.1	0	0	0	0
CG23.1	0	0	0	0
CG24.1	0	0	0	0
CG25.1	0	0	0	0
CG26.1	0	0	0	0
CG27.1	0	0	0	0
CG28.1	0	0	0	0
CG29.1	0	0	0	0
CG29.2	0	0	0	0
CG30.1	0	0	0	0
CG31.1	0	0	0	0
CGJ31.2	0	0	0	0
CG31.3	0	0	0	0
CG32.1	0	0	0	0
CG33.1	0	0	0	0
CG34.1	0	0	0	0
CG35.1	0	0	0	0
CG36.1	0	0	0	0
CG37.1	0	0	0	0
CG37.2	0	0	0	0
CG38.1	0	0	0	0
CG38.2	0	0	0	0
CL1.1	0	0	0	0
CLJ2.1	0	0	0	0
CL2.2	0	0	0	0

CL3.1	0	0	0	0
CL3.2	0	0	0	0
CL3.3	0	0	0	0
CL3.4	0	0	0	0
CL3.5	0	0	0	0
CL3.6	0	0	0	0
CL3.7	0	0	0	0
CL3.8	0	0	0	0
CL3.9	0	0	0	0
CL4.1	0	0	0	0
CL5.1	0	0	0	0
CL6.1	0	0	0	0
CL6.2	0	0	0	0
CL7.1	0	0	0	0
CL8.1	0	0	0	0
CL9.1	0	0	0	0
CL10.1	0	0	0	0
CL11.1	0	0	0	0
CG39.1	0	0	0	0
CGJ39.2	0	0	0	0
CGJ39.3	0	0	0	0
CG39.4	0	0	0	0
CG39.5	0	0	0	0
CG40.1	0	0	0	0
CG41.1	0	0	0	0
CG41.2	0	0	0	0
CG41.3	0	0	0	0
CG41.4	0	0	0	0
CG41.5	0	0	0	0
CG41.6	0	0	0	0
CG42.1	0	0	0	0
CG43.1	0	0	0	0
CG43.2	0	0	0	0

	Evento 27	Evento 49	Evento 52	Evento 53
Name	Initial Flow	Initial Flow	Initial Flow	Initial Flow
CP1	0.02	0.03	0.03	0.03
CP2	0.05	0.06	0.08	0.08
CP3	0.22	0.29	0.38	0.39
CP4	0.26	0.34	0.44	0.45
CP5	0.27	0.36	0.47	0.48
CP6	0.28	0.36	0.48	0.49
CP7	0.28	0.37	0.48	0.49
CP8	0.28	0.37	0.49	0.5
CP9	0.29	0.38	0.5	0.52
CP10	0.32	0.42	0.55	0.57
CP11	0.32	0.42	0.55	0.57
CP12	0.33	0.42	0.56	0.57
CP13	0.33	0.43	0.57	0.58
CP14	0.33	0.44	0.57	0.59
CP15	0.34	0.44	0.57	0.59
CP16	0.35	0.46	0.6	0.61
CP17	0.4	0.52	0.68	0.7
CP18	0.4	0.52	0.68	0.7
CP19	0.41	0.54	0.7	0.72

CP20	0.44	0.57	0.75	0.78
CP21	0.55	0.72	0.94	0.97
CP22	0.55	0.72	0.94	0.97
CP23	0.56	0.72	0.95	0.98
CP24	0.56	0.73	0.95	0.98
CP25	0.56	0.73	0.96	0.98
CP26	0.56	0.73	0.96	0.99
CP27	0.56	0.74	0.96	0.99
CP28	0.57	0.74	0.97	1
CP29	0.57	0.74	0.97	1
CP30	0.58	0.75	0.98	1.01
CP31	0.58	0.75	0.99	1.02
CP32	0.58	0.75	0.99	1.02
CP33	0.58	0.75	0.99	1.02
CP34	0.58	0.76	0.99	1.02
CP35	0.72	0.94	1.24	1.27
CP36	0.74	0.97	1.27	1.31
CP37	0.77	1.01	1.32	1.36
CP38	0.78	1.01	1.33	1.37
CP39	0.78	1.02	1.34	1.38
CS1	0.01	0.02	0.02	0.02
CS2.1	0	0	0	0
CT1	0	0.01	0.01	0.01
CS2.2	0.05	0.06	0.08	0.09
CS3.1	0	0	0	0
CS3.2	0.01	0.01	0.02	0.02
CS3.3	0.09	0.12	0.16	0.16
CS4.1	0	0	0	0
CT2	0	0	0	0
CS4.2	0.01	0.02	0.02	0.02
CT3.1	0	0	0	0
CT4	0	0	0	0
CT3.2	0.01	0.01	0.01	0.01
CS4.3	0.03	0.04	0.05	0.05
CS4.4	0.04	0.06	0.07	0.08
CS4.5	0.06	0.08	0.1	0.1
CS4.6	0.09	0.11	0.15	0.15
CS4.7	0.09	0.12	0.16	0.16
CS4.8	0.1	0.13	0.17	0.18
CS4.9	0.11	0.14	0.18	0.19
CS4.10	0.11	0.14	0.19	0.19
CS4.11	0.12	0.15	0.2	0.2
CS4.12	0.12	0.15	0.2	0.21
CS4.13	0.12	0.16	0.21	0.21
CG1.1	0	0	0	0
CG1.2	0	0	0	0
CG2.1	0	0	0	0
CG3.1	0	0	0	0
CG4.1	0	0	0	0
CG5.1	0	0	0	0
CGJ6.1	0	0	0	0
CG6.2	0	0	0	0
CGJ7.1	0	0	0	0
CG7.2	0	0	0	0
CG7.3	0	0	0	0
CG8.1	0	0	0	0

CG9.1	0	0	0	0
CG10.1	0	0	0	0
CG11.1	0	0	0	0
CG12.1	0	0	0	0
CG13.1	0	0	0	0
CG14.1	0	0	0	0
CG15.1	0	0	0	0
CG15.2	0	0	0	0
CGJ16.1	0	0	0	0
CG16.2	0	0	0	0
CG16.3	0	0	0	0
CG16.4	0	0	0	0
CG16.5	0	0	0	0
CG17.1	0	0	0	0
CG18.1	0	0	0	0
CG19.1	0	0	0	0
CG20.1	0	0	0	0
CG21.1	0	0	0	0
CG21.2	0	0	0	0
CG22.1	0	0	0	0
CI1.1	0	0	0	0
CI1.2	0	0	0	0
CI2.1	0	0	0	0
CG23.1	0	0	0	0
CG24.1	0	0	0	0
CG25.1	0	0	0	0
CG26.1	0	0	0	0
CG27.1	0	0	0	0
CG28.1	0	0	0	0
CG29.1	0	0	0	0
CG29.2	0	0	0	0
CG30.1	0	0	0	0
CG31.1	0	0	0	0
CGJ31.2	0	0	0	0
CG31.3	0	0	0	0
CG32.1	0	0	0	0
CG33.1	0	0	0	0
CG34.1	0	0	0	0
CG35.1	0	0	0	0
CG36.1	0	0	0	0
CG37.1	0	0	0	0
CG37.2	0	0	0	0
CG38.1	0	0	0	0
CG38.2	0	0	0	0
CL1.1	0	0	0	0
CLJ2.1	0	0	0	0
CL2.2	0	0	0	0
CL3.1	0	0	0	0
CL3.2	0	0	0	0
CL3.3	0	0	0	0
CL3.4	0	0	0	0
CL3.5	0	0	0	0
CL3.6	0	0	0	0
CL3.7	0	0	0	0
CL3.8	0	0	0	0
CL3.9	0	0	0	0

CL4.1	0	0	0	0
CL5.1	0	0	0	0
CL6.1	0	0	0	0
CL6.2	0	0	0	0
CL7.1	0	0	0	0
CL8.1	0	0	0	0
CL9.1	0	0	0	0
CL10.1	0	0	0	0
CL11.1	0	0	0	0
CG39.1	0	0	0	0
CGJ39.2	0	0	0	0
CGJ39.3	0	0	0	0
CG39.4	0	0	0	0
CG39.5	0	0	0	0
CG40.1	0	0	0	0
CG41.1	0	0	0	0
CG41.2	0	0	0	0
CG41.3	0	0	0	0
CG41.4	0	0	0	0
CG41.5	0	0	0	0
CG41.6	0	0	0	0
CG42.1	0	0	0	0
CG43.1	0	0	0	0
CG43.2	0	0	0	0

ANEXO A – Procedimentos de Cálculo adotados pelo SWMM (traduzido de
JAMES ET AL., 2008)

MÓDULO RUNOFF

Escoamento Superficial

No SWMM o módulo Runoff é o responsável pela formação inicial do escoamento. A preparação dos dados e o esforço do usuário são essenciais para uma boa execução do módulo. Para compreender melhor a conversão da chuva efetiva (precipitação subtraída das perdas por infiltração e/ou evaporação) em escoamento superficial, serão apresentados alguns procedimentos de cálculos empregados pelo modelo.

As sub-bacias são divididas em três subáreas que simulam áreas impermeáveis, com e sem armazenamento em depressões, e áreas permeáveis, com armazenamento em depressões. Essas áreas são A1, A3 e A2, respectivamente, na Figura 1.

Figura 1 – Esquemática das sub-bacias para os cálculos do escoamento superficial.

Fonte: Garcia (2005).

A profundidade do armazenamento em depressões é um parâmetro de entrada para as áreas permeáveis e impermeáveis de cada sub-bacia. A área impermeável sem armazenamento é definida pelo parâmetro PCTZER (%), da seguinte forma:

$$A3 = \frac{PCTZER}{100} (A1 + A3) \quad (1)$$

Na qual:

PCTZER = porcentagem das áreas impermeáveis sem armazenamento.

O modelo sugere o valor de 25% para esse parâmetro.

Para a geração do escoamento superficial as subáreas são consideradas reservatórios não-lineares (Figura 2).

Figura 2 – Modelo de reservatório não-linear.

Fonte: Garcia (2005).

O reservatório não-linear é definido a partir da combinação da equação da continuidade com a equação de Manning. A continuidade deve ser determinada para a subárea como:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A \cdot i^* - Q \quad (2)$$

Em que:

$V = A \cdot d$ = Volume de água sobre a subárea (m^3);

d = profundidade de água (m);

t = tempo (s),

A = área da sub-bacia (m^2);

i^* = chuva efetiva (m/s);

Q = vazão (m^3/s).

A vazão é gerada através da equação de Manning:

$$Q = W \cdot \frac{1}{n} (d - dp)^{5/3} S^{1/2} \quad (3)$$

Na qual:

W = largura da sub-bacia (m);

n = coeficiente de rugosidade de Manning;

dp = profundidade do armazenamento em depressão (m);

S = declividade da sub-bacia (m/m).

Deve-se fazer a combinação dessas duas equações em uma equação diferencial não-linear, resolvida para valores desconhecidos de d , produzindo a seguinte equação:

$$\frac{dd}{dt} = i^* - \frac{W}{A \cdot n} (d - dp)^{5/3} S^{1/2} = i^* + WCON \cdot (d - dp)^{5/3} \quad (4)$$

Em que:

$$WCON = \frac{W \cdot S^{1/2}}{A \cdot n} \quad (5)$$

A Equação 4 é resolvida para cada intervalo de tempo pelo método de diferenças finitas. A chuva efetiva é dada pelo programa como uma média no passo de tempo. A média dos fluxos de saída é calculada usando a média entre as alturas de armazenamento. Sendo estas representadas como d_1 e d_2 para o início e o final do intervalo de tempo, respectivamente, a equação pode ser escrita como:

$$\frac{d_2 - d_1}{\Delta t} = i * + WCON \cdot \left[d_1 + \frac{1}{2}(d_2 - d_1) - d_p \right]^{5/3} \quad (6)$$

Na qual:

Δt = intervalo de tempo (s).

Essa equação é solucionada para d_2 através do processo iterativo de Newton-Raphson.

Infiltração

Para o cálculo da infiltração em áreas permeáveis o modelo SWMM dispõe de três diferentes opções para sua estimativa: o modelo de Horton, Green Ampt e o método do SCS. No presente trabalho optou-se pelo modelo de Horton na determinação da infiltração. A equação de Horton calcula a capacidade de infiltração no solo como uma função no tempo:

$$I = I_b + (I_0 - I_b) \cdot e^{-kt} \quad (7)$$

Na qual:

I = capacidade de infiltração no solo (mm/h);

I_b = taxa mínima de infiltração (mm/h);

I_0 = taxa máxima de infiltração (mm/h);

t = tempo ocorrido desde a saturação superficial do solo (s);

k = constante de decaimento (1/h).

MÓDULO EXTRAN

As equações diferenciais, para problemas de drenagem, empregadas pelo SWMM para escoamentos não-permanentes, em canais abertos, são as equações de St. Venant. A equação da continuidade para escoamentos não-permanentes com área e vazão como variáveis dependentes é:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

Em que:

A = área da seção transversal;

Q = vazão;

X = comprimento do canal/conduto;

t = tempo.

A equação do momento pode ser escrita de diversas formas, dependendo das variáveis dependentes. Utilizando a vazão (Q) e a cota piezométrica (H), altitude do fundo acrescida da profundidade de água, a equação de momento fica da seguinte forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2 / A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (9)$$

Na qual:

g = aceleração da gravidade;

H = z + h = cota piezométrica;

Z = altitude do fundo do canal/conduto;

h = profundidade de água; e

S_f = declividade da linha de energia.

(A declividade do fundo está incorporada pelo H).

O módulo EXTRAN utiliza a equação do momento nos links (condutos e canais) e, para os nós, adota a equação da continuidade, conservando o momento nos links e a continuidade nos nós.

A Equação 9 é modificada pela seguinte substituição:

$$\frac{Q^2}{A} = V^2 A \quad (10)$$

$$\frac{\partial(V^2 A)}{\partial x} = 2AV \frac{\partial V}{\partial x} + V^2 \frac{\partial A}{\partial x} \quad (11)$$

Em que:

V = velocidade média do conduto.

Substituindo na Equação 9:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2AV \frac{\partial V}{\partial x} + V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (12)$$

Essa é a equação de momento empregada no módulo EXTRAN e suas variáveis dependentes (Q, A, V e H).

A equação da continuidade (Equação 8) deve ser manipulada de forma a substituir o segundo termo da Equação 12, utilizando Q = AV:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + A \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

Ou, rearranjando os termos e multiplicando por V:

$$AV \frac{\partial V}{\partial x} = -V \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} \quad (14)$$

Substituindo a Equação 14 na Equação 12 para eliminar o termo $\partial V/\partial x$, temos a equação aplicada ao longo dos condutos pelo EXTRAN:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

Para a resolução desta equação foi utilizada a solução explícita iterativa, disponibilizada pelo modelo.

A Equação 15 é a base da solução explícita. Para as soluções explícitas iterativa a equação do momento é derivada das equações 8 e 9 da seguinte maneira: o termo $d(Q^2/A)/dx$ na Equação 9 é desenvolvido como um produto de Q e Q/A no lugar de V^2/A como na solução explícita.

$$\frac{\partial Q^2 A}{\partial x} = Q^2 \frac{\partial(1/A)}{\partial x} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} = Q^2 \frac{\partial(1/A)}{\partial x} + 2V \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (16)$$

Novamente, a equação da continuidade (8) é usada para substituir o termo $\partial Q/\partial x$ da Equação 16. Esse termo é inadmissível no módulo, já que o escoamento é considerado constante no conduto. A equação do momento utilizada, no link, para as soluções explícita iterativa é vista como:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} + Q^2 \frac{\partial(1/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

Equações Básicas do Escoamento

Dentro do módulo EXTRAN, combina-se a equação do momento com a equação da continuidade, obtendo uma equação aplicada ao longo de cada conduto, para cada intervalo de tempo:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

Na qual:

Q = descarga ao longo do conduto;

V = velocidade no conduto;

A = área da seção transversal;

H = cota piezométrica; e

S_f = declividade da linha de energia.

As unidades das variáveis são definidas pelo usuário, e o módulo as utiliza tanto para os arquivos de entrada, como para os de saída.

A declividade da linha de energia é definida pela equação de Manning:

$$S_f = \frac{k}{gAR^{4/3}} QV \quad (19)$$

Em que:

$k = gn^2$;

n = coeficiente de rugosidade de Manning;

g = aceleração da gravidade; e

R = raio hidráulico.

Substituindo na Equação 18 e expressando em diferença finita, tem-se:

$$Q_{t+\Delta t} = Q_t - \frac{k\Delta t}{R^{4/3}} V_t Q_{t+\Delta t} + 2V(\Delta A / \Delta t)_t \Delta t + V^2[(A_2 - A_1) / L] \Delta t - gA[(H_2 - H_1) / L] \Delta t \quad (20)$$

Na qual:

Δt = intervalo de tempo; e

L = comprimento do conduto.

Resolvendo a Equação 20 para $Q_{t+\Delta t}$, tem-se a diferença finita final para a equação dinâmica do escoamento:

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{1}{1 + \frac{k\Delta t}{R^{4/3}V}} \left[Q_t + 2\bar{V}(\Delta A / \Delta t)_t \Delta t + \bar{V}^2[(A_2 - A_1) / L] \Delta t - g\bar{A}[(H_2 - H_1) / L] \Delta t \right] \quad (21)$$

Na Equação 21, V , R e A são médias ponderadas dos valores no final do conduto no tempo t , e $(\Delta A / \Delta t)_t$ é a derivada do tempo para os intervalos anteriores.

As variáveis desconhecidas da Equação 21 são: $Q_{t+\Delta t}$, H_2 e H_1 . As variáveis V , R e A podem ser relacionadas a Q e H . Portanto, outras equações são necessárias para relacionar Q e H , o que pode ser obtido através do emprego da equação da continuidade no nó:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \sum Q_i / A_{S_i} \quad (22)$$

Ou, na forma de diferença finita:

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \sum Q_i \Delta t / A_{S_i} \quad (23)$$

Em que:

A_s = área da superfície do nó.

Solução da equação do escoamento pelo método de Euler modificado:

As equações 21 e 23 podem ser resolvidas sequencialmente para determinar a vazão, em cada conduto, e a profundidade, em cada nó, em um intervalo de tempo Δt . A integração numérica dessas duas equações é aperfeiçoada pelo método de Euler modificado. Os resultados provaram ser

relativamente precisos e, quando algumas restrições são consideradas, estáveis. A Figura 3 apresenta como o processo funciona quando somente a equação de descarga é incluída.

Figura 3 - Método de Euler modificado para a descarga baseado nas projeções de $t+\Delta t/2$ e $t+\Delta t$.

Fonte: Garcia (2005).

As três primeiras operações determinam a declividade $\partial Q/\partial t$ na metade do intervalo de tempo. Em outras palavras, é considerado que a declividade no tempo $t+\Delta t/2$ é a declividade média do intervalo. O método é facilmente estendido para mais de uma equação, embora a representação gráfica seja complexa. Os cálculos correspondentes à cota de $t+\Delta t/2$ e $t+\Delta t$ são mostrados a seguir:

Metade do intervalo de tempo no nó j: $t+\Delta t/2$

$$H_j(t + \Delta t / 2) = H_j(t) + (\Delta t / 2) \left\{ (1/2) \sum \left[\frac{Q(t) + Q(t + \Delta t / 2)}{\sum [Q(t + \Delta t / 2)]} \right] \right\} / A_{S_j}(t) \quad (24)$$

Intervalo de tempo completo no nó j: $t+\Delta t$

$$H_j(t + \Delta t) = H_j(t) + \Delta t \left\{ (1/2) \sum \left[\frac{Q(t) + Q(t + \Delta t)}{\sum [Q(t + \Delta t)]} \right] \right\} / A_{S_j}(t) \quad (25)$$

Nota-se que o cálculo da cota, na metade do intervalo de tempo, utiliza o cálculo da vazão na metade do intervalo de tempo para os condutos conectados. Similarmente, o cálculo no intervalo completo requer a vazão para o intervalo completo, para os condutos conectados. Adicionalmente, as entradas e desvios de fluxo para cada nó por vertedores, orifícios e bombas devem ser calculados em cada metade e todo intervalo de tempo.

Estabilidade Numérica

Restrições no intervalo de tempo:

O método modificado de Euler produz uma solução completamente explícita, na qual a equação do movimento é aplicada na determinação da vazão para cada conduto e a equação da continuidade na determinação da profundidade para cada nó, com certa ligação implícita durante o intervalo de tempo. Sabe-se que os métodos explícitos envolvem aritmética simples e requerem pouco espaço de armazenamento, comparados com os métodos implícitos. Entretanto, são geralmente menos estáveis, necessitando intervalos de tempo menores. A partir disso, experiências com o módulo EXTRAN indicaram estabilidade numérica do modelo quando respeitadas as seguintes inequações:

Condutos:

$$\Delta t \leq L / (gD)^{1/2} \quad (26)$$

Em que:

Δt = intervalo de tempo (s);

L = comprimento do conduto (m);

g = aceleração da gravidade (m/s^2); e

D = profundidade máxima do conduto (m).

A Equação 26 é conhecida como forma da condição de Courant, na qual o intervalo de tempo é limitado para um tempo requerido pela onda dinâmica, para propagar o comprimento de um conduto.

Nós:

$$\Delta t \leq \frac{C' A_s \Delta H_{\max}}{Q} \quad (27)$$

Na qual:

C' = constante adimensional, aproximadamente 0,1.

$\Delta H_{\max}$ = nível máximo da superfície de água no intervalo de tempo;

A_s = área da superfície do nó; e

Q = vazão na entrada do nó.

A análise das inequações 26 e 27 revela que o valor máximo do intervalo de tempo permitido, Δt , deve ser determinado pelos condutos mais curtos, com grandes vazões de entrada. Se a estabilidade numérica não for atingida, será necessário que o usuário elimine ou agregue condutos e canais menores.

Condutos equivalentes:

Um conduto equivalente é a substituição computacional de um elemento do sistema de drenagem por um conduto imaginário, hidraulicamente idêntico ao elemento substituído. Geralmente, um conduto equivalente é utilizado quando se suspeita que algum elemento da rede de drenagem deva causar instabilidade numérica ao sistema. Os condutos curtos são, freqüentemente, causadores de problemas de instabilidade, sendo necessária sua substituição por condutos equivalentes. Os orifícios não apresentam este problema, pois são automaticamente convertidos para condutos equivalentes pelo programa.

Solução da equação do escoamento pelo método iterativo

A forma da diferença finita para a solução iterativa da equação dinâmica do escoamento é a seguinte:

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{\left\{ Q_t + (1-w) \left[-g \bar{A} \left(\frac{H_2 - H_1}{L} \right) \Delta t \right] + \frac{k \Delta t}{R^{4/3}} V + \left[\left(\frac{Q/A_2 - Q/A_1}{L} \right) \Delta t \right]_t \right\} + w \left\{ -g \bar{A} \left[\left(\frac{H_2 - H_1}{L} \right) \Delta t \right]_{t+\Delta t} \right\} + V \left(\frac{\Delta A}{\Delta t} \right)}{w \left[\frac{k \Delta t}{R^{4/3}} V + \left[\left(\frac{Q/A_2 - Q/A_1}{L} \right) \Delta t \right]_{t+\Delta t} \right]} \quad (28)$$

Os valores de V, R e A são médias ponderadas dos valores a montante, no centro e a jusante dos condutos, para os tempos t e/ou t+Δt. Os valores para o intervalo de tempo t+Δt são valores da iteração atual. Na primeira iteração eles são iguais aos valores previstos no intervalo de tempo. A₁, A₂, H₁ e H₂ correspondem às áreas das seções transversais e às profundidades dos condutos no nó a montante (1), e a jusante (2). V(ΔA/Δt) é a área média do conduto derivada no tempo, e a velocidade média no conduto, baseada na média ou na diferença do intervalo de tempo anterior e a atual iteração. O valor de w, fator de multiplicação, é 0,55.

As variáveis desconhecidas da Equação 28 são Q_{t+Δt}, H₂ e H₁. as variáveis V, R, A, A₁ e A₂ podem ser relacionadas a Q e H. a equação da continuidade aplicada no nó relaciona Q e H:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial t} \right)_t = \frac{\sum (Q_t + Q_{t+\Delta t})}{A_{S_t} + A_{S_{t+\Delta t}}} \quad (29)$$

Na qual:

A_{S_t} = área da superfície do nó no tempo t; e

A_{S_{t+Δt}} = área da superfície do nó no tempo t+Δt.

As equações 28 e 29 podem ser resolvidas iterativamente para determinação da vazão em cada conduto e da profundidade em cada nó, ao fim de cada intervalo de tempo. A integração numérica das duas equações é realizada através da solução de uma matriz iterativa

O método iterativo adota um fator de 0,75 para a primeira iteração e 0,50 para as iterações subsequentes. Assim, a nova estimativa de $Q_{t+\Delta t}$ em cada iteração é:

$$Q_{t+\Delta t} = (1 - U_f)Q_j + U_f Q_{j+1} \quad (30)$$

Em que:

U_f = fator de sob-relaxação (0,75 ou 0,50);

Q_j = vazão do conduto na iteração j ; e

Q_{j+1} = vazão do conduto na iteração $j+1$.

Similarmente, a estimativa da profundidade no nó para cada iteração é:

$$H_{t+\Delta t} = (1 - U_f)H_j + U_f H_{j+1} \quad (31)$$

Em que:

U_f = fator de sob-relaxação (0,75 ou 0,50);

H_j = profundidade do nó na iteração j ; e

H_{j+1} = profundidade do nó na iteração $j+1$.

O novo intervalo de tempo da solução é encontrado quando todas as vazões e profundidades estimadas satisfizerem o critério de convergência. Os critérios de convergência para as vazões dos condutos e profundidades dos nós são, respectivamente:

$$|Q_{j+1} - Q_j| / Q_{full} \leq SURTOL \quad (32)$$

$$|H_{j+1} - H_j| / H_{crown} \leq SURTOL \quad (33)$$

Nas quais:

Q_{full} = vazão de projeto do conduto; e

H_{full} = distância entre o fundo e o topo do nó.

A vazão de projeto, para condutos com declividade zero, é baseada em uma diferença de 0,01 metros assumida entre a cota de fundo montante e a de jusante. O método iterativo usa um intervalo de tempo variável. O intervalo de tempo, especificado nos dados de entrada do modelo (DELT= comprimento do intervalo de tempo), é o máximo intervalo permitido durante a simulação. O programa selecionará o intervalo de tempo baseado no menor número de Courant dos condutos no início de cada intervalo. O modelo determina o número do menor comprimento de intervalo de tempo requerido igual a DELT.

O número de Courant para os condutos fechados é, como segue:

$$C\# = \frac{L}{V + (gD)^{1/2}} \quad (34)$$

E para canais abertos:

$$C\# = \frac{L}{V + (gA/T)^{1/2}} \quad (35)$$

Nas quais:

$C\#$ = número de Courant para condutos (s);

L = comprimento do conduto (m);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

D = profundidade do conduto (m);

V = velocidade média no conduto (m/s);

A = área da seção transversal (m^2); e

T = largura do conduto (m).