TAÍS ARRIERO SHINMA

**Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada à
transformação chuva-vazão**

São Carlos (SP), 2011.

TAÍS ARRIERO SHINMA

**Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada à
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 Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientadora: Profa. Tit. Luisa Fernanda Ribeiro Reis

São Carlos (SP), 2011.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S556c Shinma, Taís Arriero
Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada à
transformação chuva-vazão / Taís Arriero Shinma ;
orientadora Luisa Fernanda Ribeiro Reis. -- São Carlos,
2011.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e
Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2011.

1. Drenagem urbana. 2. Calibração automática.
3. SWMM. 4. NSGA II I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheira **TAÍS ARRIERO SHINMA**.

Dissertação defendida e julgada em 24/05/2011 perante a Comissão Julgadora:

Prof.^a. Titular **LUISA FERNANDA RIBEIRO REIS – (Orientadora)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovada

Prof. Dr. **EDUARDO MARIO MENDIONDO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADA

Prof. Dr. **ADEMIR PACELI BARBASSA**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar) APROVADA

Prof. Titular **EDSON CEZAR WENDLAND**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

*Para minha mãe, minha melhor amiga;
e meu pai, meu protetor.*

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À professora Fernanda, pela orientação, paciência, e amizade.

Aos integrantes da banca examinadora, pela disponibilidade em participar.

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

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade de São Paulo, pela excelente estrutura disponibilizada.

Ao professor Eduardo Mario Mendonço, ao Richard Pehovaz e à Milena Collodel, pelo fornecimento dos dados utilizados neste estudo.

Às funcionárias do Departamento de Hidráulica e Saneamento: Sá, Rose, Marília, Flávia, Fernanda e Pavi, pela colaboração e gentileza. Ao funcionário André, pelos socorros prestados a todo momento.

Aos professores Paula Loureiro Paulo e Peter Cheung, da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), por despertarem meu interesse pela carreira acadêmica.

Aos companheiros do Laboratório de Simulação Numérica (Labsim): Rafa e Fred, pela companhia e bom humor.

Aos amigos Patrick, Diogo e Narumi, pela essencial ajuda com a Linguagem de Programação.

Aos amigos Elo, Aline, Ludi, Carlão, Marjo e Lele, pelo companheirismo e amizade em São Carlos. Pela amizade e carinho mesmo à distância: Paty, Sassá, Camila, Bruno, Vituxo, Hugo e Kelly.

Às integrantes da Rep. Melhor de Três: Aline e Drica, minhas irmãs de coração.

Aos meus irmãos: Enio e Renê, por sempre me protegerem, mostrando o melhor caminho, e pelo constante interesse pela minha pesquisa. Obrigada por sempre torcerem por mim.

Finalmente, aos meus pais Januário e Alice, pelo amor e apoio incondicional a todos os meus projetos. Obrigada por possibilitarem a minha formação profissional e pessoal, e especialmente pela paciência e apoio no dia-a-dia. Vocês são a razão de todas as minhas conquistas.

"In theory, there is no difference between theory and practice.

But, in practice, there is."

(Jan L. A. van de Snepscheut e/ou Yogi Berra)

RESUMO

SHINMA, T. A. (2011). **Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada à transformação chuva-vazão**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 136p.

Um calibrador automático multiobjetivo para o Storm Water Management Model (SWMM) foi desenvolvido utilizando o método de otimização multiobjetivo Non Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA II) com elitismo controlado (Deb & Goel, 2001). O programa utiliza o código fonte do SWMM na etapa de avaliação das soluções, para determinar o valor das vazões simuladas, utilizado no cálculo das funções objetivo (FOs). Os testes do calibrador foram aplicados a dois sistemas diferentes, sendo o primeiro uma bacia exemplo hipotética disponibilizada no pacote de instalação do SWMM e o segundo a bacia do córrego do Gregório, localizada no município de São Carlos (SP). Foi realizada a análise de sensibilidade para os dois sistemas, visando determinar os parâmetros a serem calibrados. De modo geral, a porcentagem de áreas impermeáveis e os parâmetros de rugosidade e de infiltração apresentaram maior influência sobre a resposta do sistema em termos de vazão de pico e volume total escoado das bacias. O programa desenvolvido se mostrou eficiente para ambos os sistemas calibrados, com coeficientes de eficiência de Nash & Sutcliffe (1970) médios de 0,99 para a bacia exemplo e 0,87 para a bacia do córrego do Gregório, respectivamente, com um número reduzido de iterações. Construído o calibrador, testes foram realizados para identificar a melhor combinação de FOs e a abordagem multievento mais eficiente. Para tanto, foram testadas 55 diferentes combinações de FOs duas a duas. Os resultados evidenciaram que a melhor combinação testada foi a F2-F6, e a abordagem multievento mais eficiente foi a avaliação da médias das FOs, considerando todos os eventos utilizados na etapa de calibração. Cabe ressaltar que estas conclusões se aplicam somente ao sistema considerado neste estudo. Por fim, a validação comprovou a eficiência do calibrador, aplicada a 10 eventos distintos registrados na bacia do córrego do Gregório, com coeficiente de eficiência médio de 0,84.

Palavras-chave: drenagem urbana, calibração automática, SWMM, NSGA II.

ABSTRACT

SHINMA, T. A. (2011). **Multiobjective calibration of SWMM applied to rainfall-runoff transformation**. Thesis (Master) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo. São Carlos, SP. 136p.

An automatic multiobjective calibrator for the Storm Water Management Model (SWMM) was developed using the Non Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA II) method with controlled elitism (Deb & Goel, 2001). The software uses the SWMM source code for evaluating the solutions, to determine the simulated flow values, used in the objective functions (OFs) calculation. The calibrator tests were applied on two different systems, a hypothetical example basin provided jointly to the SWMM installation package, and the basin of Gregório stream, located in São Carlos (SP). The sensitivity analysis was performed for both systems to determine the parameters to be calibrated. Generally, the percent of imperviousness, the roughness and infiltration parameters variations resulted in large modifications on the system response in terms of peak flow and total runoff volume. The developed software proved to be efficient for both calibrated systems, presenting an average of the Nash & Sutcliffe (1970) efficiency coefficient of 0.99 and 0.87 for the example basin and the Gregório stream basin, respectively, with a few number of iterations. After the calibrator built, tests were conducted aiming to identify the best OFs combination and the more efficient multievent approach. Thus, 55 different combinations in pairs of OFs were tested. The results showed that the best combination tested was the F2-F6 and most efficient multievent approach was the evaluation of the OFs' means, considering all the calibration events. It is worth noting that these conclusions apply only to the system considered in this study. Finally, the validation confirmed the calibrator efficiency, applied to 10 different events recorded in the Gregório stream basin, presenting an average of the efficiency coefficient of 0.84.

Keywords: urban drainage, automatic calibration, SWMM, NSGA II.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	5
2.1	Objetivo principal.....	5
2.2	Objetivos específicos.....	5
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1	A importância da modelagem hidráulico-hidrológica.....	7
3.2	Modelos de simulação	10
3.2.1	SWMM.....	13
3.3	Calibração multiobjetivo de modelos hidráulico-hidrológicos.....	19
3.4	Calibração do SWMM.....	25
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	Caracterização do problema de calibração	29
4.2	Desenvolvimento do calibrador	31
4.2.1	NSGA II.....	31
4.2.2	Arquivos de entrada e saída do calibrador.....	36
4.2.3	Código computacional.....	39
4.3	Dados utilizados nos testes do calibrador.....	45
4.3.1	Bacia exemplo do SWMM	46
4.3.2	Bacia do córrego do Gregório.....	47
4.4	Análise de sensibilidade	51
4.5	Testes.....	51
4.5.1	Calibração da bacia exemplo do SWMM.....	52
4.5.2	Conjunto de funções objetivo	54
4.5.3	Calibração da bacia do córrego do Gregório	56
4.5.4	Abordagem multievento	58
4.6	Validação	59
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1	Análise de sensibilidade	61
5.2	Calibração da bacia exemplo do SWMM.....	64
5.3	Conjunto de funções objetivo	72
5.4	Calibração da bacia do córrego do Gregório	75
5.5	Abordagem multievento	84
5.6	Validação	87
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	93
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
	APÊNDICE A – Arquivo de entrada dos parâmetros do NSGA II.....	101
	APÊNDICE B – Dados da bacia do córrego do Gregório	103
	ANEXO A – Detalhamento das seções transversais.....	106
	ANEXO B – Eventos com precipitação mínima de 10mm.....	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição da população brasileira (Adaptado de Nações Unidas, 2007).	7
Figura 2 – Fluxograma das conseqüências da urbanização na drenagem urbana.....	8
Figura 3 – Modelo de reservatório não-linear (James et al., 2008).	14
Figura 4 – Conceito de dominância.	21
Figura 5 – Soluções não dominadas.....	21
Figura 6 – Vetor solução genérico.	30
Figura 7 – Frentes de dominância.	32
Figura 8 – Demonstração da distância de multidão.	32
Figura 9 – Comparação entre os métodos de elitismo original e controlado.	35
Figura 10 – Alterações no código computacional do SWMM.	39
Figura 11 – Fluxograma das etapas do código computacional do calibrador.	40
Figura 12 – Bacia exemplo.....	46
Figura 13 – Bacia do córrego do Gregório (Fonte: Collodel, 2009).....	47
Figura 14 – Representação da bacia do córrego do Gregório no SWMM.	48
Figura 15 – Localização das seções transversais (Fonte: Collodel, 2009).....	48
Figura 16 – Distribuição das seções adotadas no sistema (Fonte: Collodel, 2009).....	49
Figura 17 – Áreas urbanas e rurais na bacia do córrego do Gregório.....	57
Figura 18 – Análise de sensibilidade da bacia exemplo – vazão de pico.....	61
Figura 19 – Análise de sensibilidade da bacia exemplo – volume total escoado.	61
Figura 20 – Vetor solução da bacia exemplo.	62
Figura 21 – Análise de sensibilidade da bacia do córrego do Gregório – vazão de pico.....	62
Figura 22 – Análise de sensibilidade da bacia do córrego do Gregório – volume total escoado.	63
Figura 23 – Vetor solução da bacia do córrego do Gregório.	63
Figura 24 – Evolução da FO1 ao longo das iterações – grupo A.	64
Figura 25 – Evolução da FO2 ao longo das iterações – grupo A.	64
Figura 26 – Evolução da FO1 ao longo das iterações – grupo B.	65
Figura 27 – Evolução da FO3 ao longo das iterações – grupo B.	65
Figura 28 – Resultados da FO1 – teste 5, grupo A.	66
Figura 29 – Resultados da FO2 – teste 5, grupo A.	66
Figura 30 – Resultados da FO1 – teste 5, grupo B.	66
Figura 31 – Resultados da FO3 – teste 5, grupo B.	67
Figura 32 – Frente Pareto formada no teste 5, grupo B.	67
Figura 33 – Variação dos valores dos parâmetros sobre o valor real – grupo A.....	68
Figura 34 – Variação dos valores dos parâmetros sobre o valor real – grupo B.	69
Figura 35 – Hidrogramas resultantes do conduto 10, grupo A.....	70
Figura 36 – Hidrogramas resultantes do conduto 8, grupo A.....	70
Figura 37 – Hidrogramas resultantes do conduto 10, grupo B.....	70
Figura 38 – Hidrogramas resultantes do conduto 8, grupo B.....	71
Figura 39 – Distância Euclidiana resultante das diferentes combinações de FOs.....	74
Figura 40 – Detalhe da comparação da distância Euclidiana.	74
Figura 41 – Resultados da combinação F2 e F6.	75
Figura 42 – Evolução do valor da F2 – bacia do córrego do Gregório.....	76
Figura 43 – Evolução do valor da F6 – bacia do córrego do Gregório.....	76
Figura 44 – Evolução das frentes Pareto – evento 3.	77
Figura 45 – Evolução do número de soluções na frente Pareto – evento 3.....	77
Figura 46 – Evolução do número de soluções por frente de dominância – evento 3.	78

Figura 47 – Resultados de F2 – evento 3.	79
Figura 48 – Resultados de F6 – evento 3.	79
Figura 49 – Resultados de F2 – evento 27.	79
Figura 50 – Resultados de F6 – evento 27.	80
Figura 51 – Resultados de F2 – evento 49.	80
Figura 52 – Resultados de F6 – evento 49.	80
Figura 53 – Frentes Pareto resultantes das calibrações dos eventos.	81
Figura 54 – Hidrogramas observado e simulado – evento 3.	83
Figura 55 – hidrogramas observado e simulado – evento 27.	83
Figura 56 – Hidrogramas observado e simulado – evento 49.	84
Figura 57 – Resultados da abordagem de Dayaratne.	85
Figura 58 – Comparação por evento entre as abordagens tradicional, de Dayaratne, média das FOs e de Pierro.	86
Figura 59 - Comparação geral entre as abordagens tradicional, de Dayaratne, média das FOs e de Pierro.	86
Figura 60 – Hidrogramas observado e simulado – evento 4.	88
Figura 61 – Hidrogramas observado e simulado – evento 7.	88
Figura 62 – Hidrogramas observado e simulado – evento 12.	88
Figura 63 – Hidrogramas observado e simulado – evento 15.	89
Figura 64 – Hidrogramas observado e simulado – evento 17.	89
Figura 65 – Hidrogramas observado e simulado – evento 30.	89
Figura 66 – Hidrogramas observado e simulado – evento 40.	90
Figura 67 – Hidrogramas observado e simulado – evento 46.	90
Figura 68 – Hidrogramas observado e simulado – evento 48.	90
Figura 69 – Hidrogramas observado e simulado – evento 55.	91
Figura 70 – Seção transversal CP1 e CS1.	107
Figura 71 – Seção transversal CP2.	107
Figura 72 – Seção transversal CS2 e CT1.	107
Figura 73 – Seção transversal CP3.	108
Figura 74 – Seção transversal CS3.	108
Figura 75 – Seção transversal CP4.	108
Figura 76 – Seção transversal CS4, CT2, CT3 e CT4.	109
Figura 77 – Seção transversal CP5.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de alguns modelos hidrológicos.	12
Tabela 2 – Aplicações da calibração multiobjetivo em modelos hidrológicos.	23
Tabela 3 – Variável associada a cada posição do vetor solução.....	30
Tabela 4 – Caracterização dos eventos escolhidos.	50
Tabela 5 – Sistemas utilizados nos testes do calibrador.....	51
Tabela 6 – Limites dos parâmetros no teste de eficiência do calibrador.	52
Tabela 7 – Funções utilizadas nos grupos de testes.	53
Tabela 8 – Limites inferior e superior dos parâmetros de calibração.	58
Tabela 9 – Diferenças entre as abordagens multievento.	59
Tabela 10 – Comparação dos valores dos parâmetros obtidos nos experimentos.	68
Tabela 11 – Resultados do coeficiente de eficiência para a bacia exemplo.....	71
Tabela 12 – Resultados das diferentes combinações de funções objetivo.	72
Tabela 13 – Valores dos parâmetros calibrados por evento.....	81
Tabela 14 – Comparação dos valores dos parâmetros calibrados com os encontrados na literatura.....	82
Tabela 15 – Coeficientes de eficiência para a bacia do córrego do Gregório.	84
Tabela 16 – Valores dos parâmetros calibrados com a configuração mais adequada.	87
Tabela 17 – Coeficientes de eficiência para a bacia do córrego do Gregório.	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estrutura do arquivo de entrada do SWMM.	37
Quadro 2 – Estrutura do arquivo de entrada do NSGA II.	38
Quadro 3 – Pseudocódigo do calibrador.	41
Quadro 4 – Arquivo de entrada dos parâmetros do NSGA II.	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGs	Algoritmos genéticos
AMALGAM	A Multi ALgorithm Genetically Adaptive Method
AMS	Adaptive Metropolis Search
CHM	Chicago Hydrograph Method
CN	Curve Number
DE	Differential Evolution
EPA	Environmental Protection Agency
FOs	Funções objetivo
HEC	Hydrologic Engineering Center
ILLUDAS	Illinois Urban Drainage Simulator
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
KBSWMM	Knowledge-based Storm Water Management Model
MOCOM	Multiobjective Complex Evolution
MOGA	Multiobjective Genetic Algorithm
MOSCEM	Multiobjective Shuffled Complex Evolution Metropolis
MOUSE	Modelling of Urban Sewer
NIBH	Núcleo Integrado de Bacias Hidrográficas
NPGA	Niched-Pareto Genetic Algorithm
NSGA	Non Dominated Sorting Genetic Algorithm
NSGA II	Non Dominated Sorting Genetic Algorithm II
OFs	Objective functions
PAES	Pareto Archive Evolution Strategy
PSO	Particle Swarm Optimization
SBX	Simulated Binary Crossover
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure
SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm
STORM	Storage, Treatment, Overflow Runoff Model
SWMM	Storm Water Management Model
UBT	Upper Bukit Timah
VEGA	Vector Evaluated Genetic Algorithm

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
A_m	Área da seção molhada
AI	Porcentagem de áreas impermeáveis
d	Profundidade da lâmina d'água no reservatório não-linear
d_c	Duração da chuva
d_p	Profundidade do armazenamento em depressão no reservatório não-linear
COE	Coeficiente de eficiência
DM	Distância de multidão
F	Valor da função objetivo
g	Aceleração da gravidade
h	Nível de água na seção
i	Intensidade da chuva
I	Capacidade de infiltração no solo
$I0$	Taxa máxima de infiltração
Ib	Taxa mínima de infiltração
i^*	Chuva efetiva
k	Constante de decaimento do modelo de Horton
L	Distância
M	Número de funções objetivo avaliadas
mn	Multiplicador do coeficiente de rugosidade de Manning para canais
mS	Multiplicador da declividade
mW	Multiplicador da largura
n	Coeficiente de rugosidade de Manning para canais
N	número de intervalos de tempo no evento de precipitação
n_c	Índice de distribuição da recombinação
n_m	Índice de distribuição da mutação
NI	Coeficiente de rugosidade de Manning para áreas impermeáveis
NP	Coeficiente de rugosidade de Manning para áreas permeáveis
Pm	Probabilidade de mutação
Pr	Probabilidade de recombinação
q	Vazão específica

Q	Vazão
$\overline{Q}$	vazão média observada
Q_b	Vazão de base
q_{lat}	Vazão de contribuição lateral por unidade de largura
Q_{obs_i}	vazão observada no instante i
Q_p	Vazão de pico
Q_{sim_i}	vazão simulada no instante i
S	Declividade
SI	Capacidade de armazenamento em áreas impermeáveis
SP	Capacidade de armazenamento em áreas permeáveis
t	Instantes de tempo
Δt	Intervalo de tempo
Tr	Período de retorno
V	Volume
V_{inf}	Volume de infiltração acumulada
V_t	Volume total escoado
W	Largura média do escoamento na bacia
x	Variáveis de decisão
Z	Porcentagem de áreas impermeáveis sem depressão de armazenamento

1. INTRODUÇÃO

As elevadas taxas de crescimento urbano apresentadas pelos países em desenvolvimento são responsáveis por profundas modificações sobre o meio ambiente. Dentre as consequências deste acentuado processo de urbanização figuram os problemas na drenagem urbana. As áreas que anteriormente contribuíam para o armazenamento e infiltração natural das águas pluviais tornam-se impermeáveis e contribuintes para o escoamento superficial excessivo, resultando no aumento da frequência de cheias e alagamentos, e consequentes danos materiais e humanos.

Este cenário aponta para a necessidade de ferramentas que auxiliem na previsão do comportamento da drenagem durante eventos chuvosos. A simulação computacional aliada à modelagem matemática constitui ferramenta de suma importância nessa avaliação, por permitir a reprodução do comportamento dos sistemas de drenagem sob condições variadas e assim possibilitar a previsão de inundações e facilitar estudos de planejamento.

Os modelos que representam os processos hidrológicos e hidráulicos da drenagem permitem a incorporação da heterogeneidade espacial e da variabilidade temporal das bacias hidrográficas, considerando diferentes características do solo, vegetação e topografia, além de eventos chuvosos variáveis no espaço e no tempo. Devido a essa capacidade, os modelos requerem que valores sejam atribuídos aos parâmetros que caracterizam cada bacia considerada. Buscando uma melhor representação da realidade, a determinação destes parâmetros é de extrema importância para avaliar e comparar as respostas produzidas pelos modelos com as observações de campo, para as mais diversas situações. Porém, alguns destes parâmetros não são mensuráveis ou são dificilmente determináveis em campo, devido à falta de informação sobre as bacias hidrográficas, desatualização das informações existentes, ou ainda, dificuldades de acesso ao local. Tais parâmetros são então estimados através de métodos indiretos como a calibração, um componente essencial para assegurar a qualidade das respostas produzidas pelo modelo e a sua confiabilidade. Através da calibração, os valores dos parâmetros são ajustados comparando-se as vazões observadas com os respectivos valores simulados ao longo do tempo, para os eventos de chuva escolhidos.

A calibração dos parâmetros pode ser realizada por tentativa e erro (manual) ou automaticamente. Em geral, o primeiro método é considerado desvantajoso devido à sua subjetividade e ao tempo demandado pelo processo; além disso, a experiência adquirida após extensivo treinamento não é facilmente ensinada a outra pessoa. O método automático acelera

e torna o processo de busca mais eficiente, e por isso vem sendo largamente estudado (Duan et al., 1992; Gupta et al., 1998; Yapo et al., 1998; Boyle et al., 2000).

A calibração é feita geralmente pela minimização (ou maximização) de funções objetivo que medem o desvio entre as séries de vazão observadas e simuladas. Inicialmente, os estudos de calibração focavam na otimização de objetivo único, porém percebeu-se que uma única função não se mostrava suficiente para representar adequadamente o problema de calibração, que em geral envolve objetivos conflitantes. Passou-se então a adotar uma postura multiobjetivo. Efstradiadis & Koutsoyiannis (2010) realizaram um levantamento dos estudos de calibração multiobjetivo de modelos hidrológicos desenvolvidos na última década, e afirmam que o método é bastante confiável e consistente.

Um dos principais modelos de simulação da drenagem é o Storm Water Management Model (SWMM), atualmente sob responsabilidade da EPA (Environmental Protection Agency), que teve como precursores os pesquisadores Metcalf e Eddy, a Water Resources Engineers e a Universidade da Flórida, em 1971 (James et. al., 2008). Trata-se de um modelo de simulação dinâmica da transformação chuva-vazão, utilizado para análise qualitativa de eventos discretos ou contínuos. Merece destaque por tratar-se de um pacote de domínio público, amplamente utilizado por pesquisadores e profissionais do mundo todo. Durante as últimas décadas, alguns estudos abordaram a calibração do SWMM (Baffaut & Delleur, 1989; Liong et. al., 1995; Barco et. al.; 2008), a maioria deles utilizando otimização de objetivo único.

O presente trabalho visa à elaboração de um calibrador multiobjetivo do SWMM para ajuste dos seus parâmetros, com vistas à melhor representação quantitativa da transformação chuva-vazão. Para tanto, um software foi desenvolvido através da alteração do código computacional do SWMM, utilizado para a avaliação das funções objetivo. O método de otimização escolhido foi o Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II), um algoritmo genético multiobjetivo elitista, proposto por Deb et. al. (2000), com elitismo controlado (Deb & Goel, 2001).

A estrutura do presente trabalho está dividida em nove partes: introdução, objetivos, revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussão, conclusões e recomendações, referências bibliográficas, apêndices e anexos. A introdução visa situar o problema, destacando a justificativa do presente trabalho. Posteriormente, os objetivos alcançados pela pesquisa são enumerados. Na revisão bibliográfica, são discutidos assuntos como a importância da modelagem hidráulico-hidrológica e os modelos de simulação,

especialmente o SWMM e suas funcionalidades. Também é discutida a problemática da calibração de modelos e os métodos de otimização multiobjetivo. A metodologia descreve como foi desenvolvido o calibrador e como foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros. Alguns testes realizados com o calibrador desenvolvido são descritos. Os resultados são apresentados conforme obtidos em cada etapa do trabalho. Nas conclusões e recomendações são resumidas as conclusões do trabalho, e enumeradas as possibilidades futuras de pesquisa. Nas referências bibliográficas são indicadas as obras utilizadas como fonte de pesquisa. Por fim, são apresentados os apêndices e anexos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

O principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um calibrador multiobjetivo genérico para o SWMM, visando à melhor representação quantitativa do processo de transformação chuva-vazão.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos estão definidos a seguir:

- Análise detalhada da literatura sobre a calibração de modelos;
- Estudo da metodologia de otimização NSGA II;
- Análise de sensibilidade do modelo aos parâmetros;
- Determinação da melhor configuração do calibrador, incluindo:
 - Conjunto de funções objetivo mais promissoras;
 - Abordagem multievento.
- Testes e validação do calibrador construído.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica foi estruturada de maneira a promover uma discussão acerca da importância da modelagem hidráulico-hidrológica, seguida de uma revisão sobre os modelos existentes, especialmente o SWMM. Posteriormente, foi apresentada a problemática da calibração de modelos e os principais métodos de otimização. Por fim, foi realizado um levantamento dos trabalhos de calibração do SWMM.

3.1 A importância da modelagem hidráulico-hidrológica

A urbanização tem se tornado cada vez mais acentuada no mundo todo, principalmente nos países em desenvolvimento, como o Brasil. O relatório das Nações Unidas (2007) apresentou dados de urbanização, com projeção da população brasileira até 2050, conforme ilustrado na Figura 1. Esta projeção é bastante preocupante, uma vez que prevê para o Brasil uma taxa de ocupação urbana de 93,6% para o ano de 2050, correspondente à população urbana de aproximadamente 238 milhões de habitantes (Nações Unidas, 2007).

Figura 1 – Distribuição da população brasileira (Adaptado de Nações Unidas, 2007).

A urbanização acarreta a impermeabilização de grandes áreas para a construção de residências, ruas, calçadas, estacionamentos, etc., reduzindo a capacidade de armazenamento e infiltração natural da água de chuva e alterando o ciclo hidrológico natural. As mudanças nas características do ciclo hidrológico ocasionadas pela diminuição da infiltração da água no solo são: 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. Além disso, Silveira (1998) cita que o crescimento vertiginoso das metrópoles nacionais e regionais no Brasil faz com que a capacidade de investimento em obras de saneamento (incluindo a drenagem urbana) seja inferior à requerida pela expansão das cidades. Devido a este problema, as redes de drenagem foram e são concebidas sem uma visão global de bacia, o que as torna ineficientes para eventos de chuvas intensas.

Sobre a população, as inundações causam inúmeros danos, como 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).

As conseqüências da urbanização são descritas resumidamente no fluxograma seguinte (Figura 2).

Figura 2 – Fluxograma das conseqüências da urbanização na drenagem urbana (Hall, 1984 apud Porto, 2004).

No Brasil, a ocorrência de inundações tem se tornado cada vez mais frequente, podendo-se citar as recentes inundações em Santa Catarina (2008), São Paulo (2010 e 2011) e no Rio de Janeiro (2010 e 2011).

Para o município de São Carlos, Mendes & Menciondo (2007) apresentaram um histórico da incidência de inundações no município de São Carlos (SP), especialmente na região do córrego do Gregório, relatando 82 casos de inundações no período de 1940 a 2004. Neste início de ano, uma inundação já foi constatada na rotatória do Cristo Redentor.

Nesse contexto, verifica-se a importância da simulação hidráulico-hidrológica, para uma melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, de forma a reproduzir o comportamento do sistema através da modelagem matemática. Conforme Rennó et al. (2010), de maneira geral, um modelo hidráulico-hidrológico é um sistema de equações e procedimentos que procura simular o percurso da água desde a precipitação até a saída da água do sistema. Para a drenagem urbana, os modelos de simulação foram desenvolvidos principalmente para a representação da transformação chuva-vazão, propagação em redes de condutos e canais abertos e transporte de poluentes pelo escoamento. Eles são compostos basicamente por duas partes sequencialmente conectadas: um modelo hidrológico, onde é feita a transformação da precipitação em escoamento superficial, e um modelo hidráulico, para a propagação do escoamento através de redes de condutos e canais (Meller, 2007).

Segundo Collodel (2009), 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. Esses modelos permitem ainda reconstituir séries hidrológicas, simular condições críticas e estudar o comportamento dos sistemas hidrológicos. 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. Tornam-se, desta forma, ferramentas essenciais para o melhor gerenciamento dos recursos hídricos, quando o tomador de decisão necessita avaliar processos quantitativos em diferentes fases e/ou segundo diferentes cenários (Ohnuma Jr, 2005).

3.2 Modelos de simulação

Os primeiros modelos hidrológicos computacionais foram 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 (Collodel, 2009). Análises comparativas entre diversos modelos existentes podem ser encontradas em Zoppou (2001) e Elliot & Trowsdale (2007).

Os modelos hidrológicos diferem em função de alguns fatores como: número de parâmetros exigidos como dados de entrada, conceitos utilizados e simplificações adotadas (Souza, 2008). De acordo com Machado (1981), essas diferenças se devem às finalidades específicas de cada modelo e às diferentes formulações matemáticas empregadas para simular os processos. Assim, surgiram algumas classificações, que podem ser encontradas em Garcia(2005), Collodel (2009), Moreira (2005) e Tucci (1998). Os critérios de classificação citados por tais autores estão resumidos a seguir:

- segundo a função: os modelos podem ser 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;
- segundo o tipo de variáveis utilizadas na modelagem: os modelos podem ser estocásticos ou determinísticos. Os modelos estocásticos envolvem pelo menos uma variável aleatória, enquanto os determinísticos não consideram os conceitos da probabilidade. Moreira (2005) ressalta que uma variável de entrada pode ser aleatória, mas o modelo ainda assim é determinístico quando cada valor de entrada produz um único valor de saída;
- segundo o tipo de relações entre as variáveis: os modelos podem ser empíricos ou conceituais. Os modelos empíricos utilizam relações baseadas apenas em observações, sendo bastante simples e específicos para cada região e situação. Os modelos conceituais são baseados nos processos que envolvem o fenômeno estudado, e são portanto mais complexos e simulam diversas situações;

- segundo a forma de representação dos dados: os modelos podem ser discretos ou contínuos. 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;
- segundo a existência das relações espaciais: os modelos podem ser concentrados, semi-distribuídos ou distribuídos. Os modelos concentrados (ou pontuais) consideram a bacia como um todo homogêneo, em que 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;
- segundo a existência da dependência temporal: os modelos podem ser estacionários ou dinâmicos. Os estacionários descrevem o fenômeno em um determinado momento, enquanto os modelos dinâmicos têm suas variáveis dependentes do tempo;
- segundo a propagação do escoamento: os modelos podem ser de armazenamento ou hidrodinâmicos. Os modelos de armazenamento, como o próprio nome indica, consideram somente os efeitos do armazenamento na atenuação e deslocamento da onda de cheia, desprezando os efeitos de atrito levados em conta pela equação da quantidade do movimento. Os modelos que utilizam as equações de Saint Venant são chamados de hidrodinâmicos. Ainda, os modelos hidrodinâmicos podem ser subdivididos em:
 - simplificados: utilizam algum método de propagação na rede baseando-se em simplificações dos termos das equações do escoamento ou análise simplificada do escoamento sob pressão. Um exemplo de modelo hidrodinâmico simplificado é o modelo da onda cinemática;
 - completos: resolvem as equações completas de Saint Venant e são capazes de representar a maioria dos fenômenos que ocorrem na propagação do escoamento em condutos, especialmente em condições críticas, tais como escoamentos sob pressão e efeitos de jusante. Um exemplo de modelo completo é o método da onda dinâmica.

Existe atualmente um grande número de modelos hidrológicos à disposição dos profissionais da área de recursos hídricos, podendo ser citados diversos softwares: SWMM, série IPH, série HEC, MOUSE, SMAP, ILLUDAS, etc. Collodel (2009) apresentou um

levantamento comparativo das características de alguns modelos hidrológicos (Tabela 1), que comprovam a maior abrangência e flexibilidade de simulação do SWMM.

Tabela 1 – Comparação de alguns 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 áreas impermeáveis	x	x	x	x	x
Escoamento de superfície de áreas permeáveis	x	x	x	x	x
Áreas diretamente conectadas	-	x	-	-	x
Balanço 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: Collodel (2009), modificado de Machado (1981) e Viessman & Lewis (2002).

Para Maksimovic (2001), a escolha do modelo depende dos objetivos da modelagem, da cobertura espacial pretendida e/ou existente, 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.

Neste trabalho, o SWMM foi escolhido devido às vastas capacidades de simulação descritas na Tabela 1 e por tratar-se de pacote bastante utilizado pelos pesquisadores na atualidade, além de ser de domínio público, e apresentar relativa simplicidade e possibilidade de interface com programas de otimização.

3.2.1 SWMM

Desde a sua criação em 1971, o SWMM vem sendo submetido a diversas melhorias, sendo apresentadas várias versões. A versão mais atualizada é a 5.0, que foi utilizada neste trabalho.

A partir de dados de precipitação e do sistema de drenagem considerado, o simulador gera escoamentos e cargas de poluentes. O sistema pode apresentar condutos, canais abertos, armazenamento, tratamento, bombas e reguladores, entre outros dispositivos. O modelo é capaz de simular resposta a chuvas de intensidade variável no tempo, evaporação ou retenção de água, acúmulo de neve e derretimento, infiltração e percolação, reservação não-linear, sistemas de tamanho ilimitado, variadas formas de condutos e canais, vários regimes de escoamento, etc. Ao longo das simulações, o SWMM aplica os princípios de conservação de massa, energia e momento, sempre que apropriado, e de acordo com as opções de modelagem feitas pelo usuário.

Assim, o SWMM possui inúmeras aplicações: análise quali-quantitativa dos problemas relacionados à drenagem, investigação de alternativas de controle do escoamento, de forma a oferecer subsídios para estimativas de custo, entre outros.

Huber & Dickinson (1992) apresentam a estrutura do modelo em nove blocos ou módulos, sendo quatro computacionais e cinco de serviços, além do módulo *Executive*, que determina a organização da ordem das simulações.

Dentre os módulos computacionais estão:

- *Runoff*: responsável pela transformação chuva-vazão, ou seja, à geração do escoamento superficial;
- *Transport*: responsável pela propagação do escoamento através da rede de drenagem pelo método da onda cinemática;
- *Extran*: responsável pela modelagem hidrodinâmica em condutos e canais;
- *Storage / Treatment*: responsável pelo tratamento e armazenamento da água.

Os módulos computacionais desenvolvem as principais rotinas de cálculo, e são auxiliados pelos módulos de serviço:

- *Statistics*: dedicado às análises estatísticas dos resultados;
- *Graph*: possibilita a apresentação dos dados de saída em forma de gráfico;

- *Combine*: possibilita a combinação de arquivos de interface;
- *Rain*: dedicado à avaliação dos dados de entrada de precipitações;
- *Temperature*: dedicado à verificação dos dados de entrada de temperatura.

James et al. (2008) descreveram os modelos utilizados pelo SWMM para descrever os diversos processos físicos que resultam na transformação chuva-vazão: escoamento superficial, infiltração, contribuição de águas subterrâneas, derretimento de gelo, propagação da vazão, acúmulo superficial e propagação da qualidade da água. Os processos de maior interesse estão descritos a seguir: escoamento superficial, infiltração e propagação da vazão.

Escoamento superficial

Para a geração do escoamento superficial, cada superfície de subárea é tratada como um reservatório não-linear (Figura 3). As entradas de vazão resultam da precipitação e possíveis aflúências de outras subáreas à montante. Existem diversas saídas de vazão: infiltração, evaporação e escoamento superficial. A capacidade deste “reservatório” é a capacidade de armazenamento máxima em depressões, resultante de alagamentos, umidificações e intercepções.

Figura 3 – Modelo de reservatório não-linear (James et al., 2008).

A vazão de saída é calculada quando o armazenamento deste reservatório é excedido, através da equação de Manning (Equação 1).

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

Em que:

W : largura da sub-bacia (m), representa a largura média de escoamento;

n : coeficiente de rugosidade de Manning;

d : profundidade da lâmina d'água (m);

d_p : profundidade do armazenamento em depressão (m);

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

A continuidade para o reservatório é determinada pela Equação 2.

$$\frac{dV}{dt} = A \cdot \frac{dd}{dt} = Ai^* - Q \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

V : volume de água sobre a subárea (m³);

t : tempo (s);

A : área da sub-bacia (m²);

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

Q : vazão (m³/s).

Combinando-se as Equações 1 e 2, tem-se:

$$\frac{dd}{dt} = i^* - \frac{W}{An} (d - d_p)^{5/3} \cdot S^{1/2} \quad \text{Equação 3}$$

Esta equação é resolvida para valores desconhecidos de d para cada intervalo de tempo pelo método das diferenças finitas. A chuva efetiva é calculada como uma média no passo de tempo. A média dos fluxos de saída é calculada utilizando a média entre as alturas de armazenamento. Sendo estas representadas por d_1 e d_2 para os instantes representativos do início e o final do intervalo de tempo, respectivamente, a equação pode ser escrita como:

$$\frac{d_2 - d_1}{\Delta t} = i^* + \frac{W.S^{1/2}}{A.n} \left[d_1 + \frac{1}{2} \cdot (d_2 - d_1) - d_p \right]^{5/3} \quad \text{Equação 4}$$

em que:

Δt : intervalo de tempo (s).

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

Infiltração

A infiltração é o processo de penetração da chuva na superfície do solo até a zona não-saturada das áreas permeáveis. O SWMM dispõe de três opções de modelagem da infiltração: Horton, Green-Ampt e Curve Number. Neste trabalho, foi adotado o método de infiltração de Horton, para facilitar comparações com outros trabalhos desenvolvidos.

Horton

O modelo de Horton é baseado em observações empíricas que mostram que a infiltração decresce exponencialmente de uma taxa inicial máxima até uma taxa mínima ao longo do processo. Os parâmetros de entrada neste método são: taxas máxima e mínima de infiltração, coeficiente de decaimento, que descreve o quão rapidamente a taxa de infiltração decresce no tempo, e um intervalo de tempo t que o solo leva pra ir de completamente saturado para completamente seco.

A equação de Horton calcula a capacidade de infiltração no solo como uma função no tempo:

$$I = I_b + (I_0 - I_b) \cdot e^{-kt} \quad \text{Equação 5}$$

em que:

I : capacidade de infiltração do solo no instante t (mm/h);

I_b : taxa mínima de infiltração (m/h);

I_0 : taxa máxima de infiltração (m/h);

t : tempo decorrido desde a saturação superficial do solo (s);

k : constante de decaimento (h^{-1}).

Assim, a infiltração acumulada será:

$$I = \int_{t1}^{t2} I^*(t) dt \quad \text{Equação 6}$$

sendo $I^*(t)$ o menor valor entre a capacidade de infiltração e a intensidade da chuva.

Green-Ampt

Assume que existe uma “camada fina” de umedecimento na coluna de solo, separando o solo com pouca umidade do solo saturado. Os parâmetros de entrada são: capacidade de sucção por capilaridade na camada úmida, déficit inicial de umidade no solo e condutividade hidráulica do solo.

Curve Number

O método de Curve Number é uma aproximação do método do SCS. Assume que a capacidade de infiltração total pode ser estimada com o CN tabelado. Esta capacidade é reduzida em função da precipitação acumulada e capacidade remanescente. Os parâmetros de entrada são: CN e o tempo que o solo leva para ir de completamente saturado a completamente seco.

Propagação do escoamento

No SWMM, a propagação da vazão dentro de um conduto é governada pelas equações de Saint Venant, representadas pelas Equações 7 e 8.

A equação da continuidade com contribuição lateral é representada por:

$$\frac{\partial A_m}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial l} = q_{lat} \quad \text{Equação 7}$$

em que:

A_m : área da seção molhada (m^2);

Q : vazão (m^3/s);

l : distância no sentido longitudinal (m);

t : tempo (s);

q_{lat} : vazão de contribuição lateral por unidade de largura (m^3/sm).

Através da variação da quantidade de movimento, considerando as forças atuantes em um volume de controle, tem-se:

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)}_{inércia} + \underbrace{g.A.\frac{\partial y}{\partial x}}_{pressão} = \underbrace{g.A.S_0}_{gravidade} - \underbrace{g.A.S_f}_{atrito} \quad \text{Equação 8}$$

em que:

g : aceleração da gravidade (m/s^2);

S_0 : declividade do canal (m/m);

S_f : declividade da linha de energia (m/m).

Nesta equação, os dois primeiros termos representam as forças de inércia do escoamento. O terceiro termo, do lado esquerdo da equação, representa a força de pressão. O primeiro termo do lado direito representa a força de gravidade e o último termo a força de atrito.

O usuário tem a opção de escolher o nível de sofisticação a ser utilizado para resolver estas equações, optando pelo método de propagação da vazão, conforme descrição sucinta a seguir.

Método do fluxo constante

É o método mais simplificado. Assume que dentro de cada passo de tempo o escoamento é uniforme e constante. O hidrograma é apenas transladado de montante para jusante do conduto, sem atraso ou alteração na forma. É, portanto, um método indicado apenas para análises preliminares.

Método da Onda Cinemática

O método da onda cinemática resolve a equação da continuidade juntamente com a equação de momento simplificada, para cada conduto, desprezando os termos de inércia e de pressão da Equação 8. Permite que a vazão e a área molhada da seção variem espacial e temporalmente dentro de um conduto. Simula atrasos e atenuações nos hidrogramas, desconsiderando efeitos de remanso, perdas, reversão da vazão e vazões pressurizadas.

Método da Onda Dinâmica

O método da onda dinâmica resolve as equações completas de Saint Venant, e, portanto, deve produzir em princípio os resultados mais precisos. Simula a equação da continuidade e do momento nos condutos e a equação da continuidade de volume nos nós. Ideal para sistemas sujeitos a restrições de vazão à jusante, efeitos de remanso, regularização de vazão e inversão de fluxo. Utiliza passos de tempo muito pequenos, demandando maior tempo de simulação.

Todos os métodos de propagação utilizam a equação de Manning, exceto para vazões pressurizadas, quando são utilizadas as equações de Hazen-Williams ou Darcy-Weisbach.

3.3 Calibração multiobjetivo de modelos hidráulico-hidrológicos

À medida que os modelos hidráulico-hidrológicos desenvolvidos se tornam mais completos e específicos, eles passam a exigir um maior número de parâmetros de entrada, para caracterizar devidamente o sistema considerado. Alguns destes parâmetros não são mensuráveis ou são dificilmente determináveis em campo, e precisam, portanto, ser estimados através de métodos de calibração.

Através da calibração, valores são atribuídos aos parâmetros, de maneira a promover o ajuste às respostas esperadas do modelo. Esse ajuste é realizado por meio da comparação entre os hidrogramas observado e simulado, utilizados no cálculo de uma ou mais funções objetivo. Trata-se de um processo complexo, cuja precisão está associada ao emprego de métodos de otimização.

Atualmente, prioriza-se a postura multiobjetivo, por entender que representa mais adequadamente o problema de calibração, que em geral envolve objetivos conflitantes.

Inicialmente, os problemas de otimização multiobjetivo eram tratados combinando-se os objetivos de uma forma escalar e resolvendo o problema de otimização de objetivo único equivalente. Esta combinação pode ser feita de várias formas: ponderação por pesos, programação por metas, método das restrições ϵ , etc. Dentre as desvantagens destas técnicas figuram a subjetividade em escolher pesos e o fato de “esconder” a competição entre os critérios.

Dentre as técnicas multiobjetivo, destacam-se os algoritmos genéticos (AGs), devido à sua vasta aplicabilidade e robustez. O uso de AGs foi proposto inicialmente por Holland (1975), inspirado nos processos de seleção natural, evolução, e sobrevivência dos indivíduos mais adaptados ao meio. Diferentemente das demais técnicas de busca, os AGs trabalham com populações (ou conjuntos de soluções), ao invés de uma única solução. Cada solução é uma especificação dos valores das variáveis de decisão do problema. A população de soluções é submetida aos processos de avaliação, seleção, recombinação e mutação em ciclos denominados gerações (ou iterações), criados de maneira a reproduzir matematicamente o comportamento de operadores genéticos, conforme os próprios nomes sugerem, até que o critério de parada seja satisfeito. Maiores detalhes do procedimento de AG adotado neste trabalho serão apresentados no item 4.2.1.

Considerando apenas um objetivo, a avaliação das soluções é calculada a partir do valor de aptidão, geralmente representado pela própria função objetivo. Entretanto, ao considerarem-se múltiplos objetivos, a avaliação de uma solução se torna dependente de todos os objetivos simultaneamente, sendo necessário aplicar o conceito de dominância de Pareto. Segundo este conceito, uma solução i domina outra solução j quando é melhor segundo todos os objetivos considerados. No caso da maximização, a solução i teria a sua avaliação superior segundo todas as funções objetivo consideradas. Se uma solução j tiver sua avaliação superior ou igual a i segundo pelo menos uma função objetivo, i e j são denominadas indiferentes, não sendo possível determinar a dominância de uma sobre a outra.

Na figura explicativa (Figura 4) de minimização de ambos os objetivos, a solução B domina a solução A; é dominada por C e D, e é indiferente a E.

Figura 4 – Conceito de dominância.

Assim, diz-se que uma solução i é não-dominada se não existe nenhuma outra solução avaliada melhor que ela segundo todos os objetivos simultaneamente. Na Figura 5, as soluções não dominadas do conjunto são destacadas, para os casos de minimização e maximização das funções f_1 e f_2 .

Figura 5 – Soluções não dominadas.

Na calibração multiobjetivo, as melhores soluções são escolhidas quando somente é possível melhorar um objetivo em detrimento do outro, sendo assumido um paradigma de compensações entre objetivos. Assim, as técnicas multiobjetivo de geração de soluções não dominadas, como os AGs, apontam não apenas uma solução, mas um conjunto de soluções alternativas para o problema, como apresentado na Figura 5. Para escolher uma dentre as soluções apontadas, diferentes técnicas podem ser aplicadas. Uma possibilidade é a escolha da solução mais próxima da origem das funções padronizadas em relação ao maior valor, pertencentes a uma reta correspondente à soma das funções padronizadas igualmente ponderadas.

Dentre as técnicas de AGs multiobjetivo, a pioneira foi a *Vector Evaluated Genetic Algorithm* (VEGA). Uma abordagem Pareto mais clara, utilizando o conceito de dominância, surgiu na década de 90, sendo os algoritmos mais representativos o *Multiobjective Genetic Algorithm* (MOGA), o *Nondominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA) e o *Niched-Pareto Genetic Algorithm* (NPGA). A estratégia comum destes métodos é associar uma função aptidão baseado na classificação Pareto ou variações dela, o que possibilita a manutenção da diversidade. Abordagens mais recentes, chamadas de segunda geração, introduziram o conceito de elitismo, que elimina o risco de perda das melhores soluções devido a efeitos randômicos. Dentre estes, os algoritmos mais populares são o *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA), o SPEA II, *Pareto Archive Evolution Strategy* (PAES) e o *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA II).

Efstratiadis & Koutsoyiannis (2010) citam que a contribuição dos hidrologistas no desenvolvimento destes algoritmos não é insignificante. Progressos significativos têm sido obtidos na Universidade do Arizona, inicialmente com o algoritmo MOCOM (*Multiobjective Complex Evolution*), proposto por Yapo et al. (1998), que é um otimizador multiobjetivo de primeira geração, que emprega a classificação Pareto dentro de um padrão baseado no algoritmo simplex; e com o MOSCEM (*Multiobjective Shuffled Complex Evolution Metropolis*), proposto por Vrugt et al. (2003), para avaliação das incertezas. Vrugt & Robinson (2007) propuseram posteriormente um algoritmo multiobjetivo geneticamente adaptativo, o AMALGAM (*A Multi Algorithm Genetically Adaptive Method*), que combina os atributos de vários outros algoritmos, incluindo NSGA II, PSO (*Particle Swarm Optimization*), AMS (*Adaptive Metropolis Search*), e DE (*Differential Evolution*).

Efstratiadis & Koutsoyiannis (2010) realizaram um levantamento de estudos de caso de calibração multiobjetivo na última década. Na Tabela 2 é apresentado um resumo das diversas contribuições encontradas na literatura.

Tabela 2 – Aplicações da calibração multiobjetivo em modelos hidrológicos.

Referência	Modelo de simulação	Formulação do problema	Método de otimização
Yapo et al. (1998)	SAC-SMA	13 parâmetros, 2 objetivos	MOCOM-UA
Gupta et al. (1998)	SAC-SMA	13 parâmetros, 3 objetivos	MOCOM-UA
Seibert (2000)	HBV	10 parâmetros, 2 objetivos	AG modificado
Madsen (2000)	MIKE 11/NAM	9 parâmetros, 4 objetivos	SCE-UA ponderado
Yu & Tang (2000)	HBV	9 parâmetros, 3 objetivos	SCE-UA
Liong et al. (2001)	HydroWorks	8 parâmetros, 2 objetivos	VEGA, MOGA, NSGA, ACGA
Madsen & Khu (2002)	MIKE 11/NAM	9 parâmetros, 2 objetivos	SCE-UA ponderado, PROSCE
Beldring (2002)	Modelo de chuva-vazão <i>physically-based</i>	11 parâmetros, 3 objetivos	MOCOM-UA
Seibert & McDonnell (2002)	Modelo conceitual 3-box <i>lumped</i>	16 parâmetros, 3 funções fuzzy	AG modificado
Cheng et al. (2002)	Xinjiang	16 parâmetros, 3 objetivos	AG multiobjetivo
Meixner et al. (2002)	Alpine Hydrochemical Model (AHM)	15 parâmetros, 4 objetivos	MOCOM-UA, combinado com análise de incerteza
Collischonn & Tucci (2003)	IPH2	7 parâmetros, 2 objetivos	MOCOM-UA
Madsen (2003)	MIKE-SHE	12 parâmetros, 2 objetivos	SCE-UA ponderado
Vrugt et al. (2003a)	SAC-SMA	13 parâmetros, 2 objetivos	MOCOM-UA, MOSCEM-UA
Ajami et al. (2004)	Múltiplas estruturas do SAC-SMA	13 parâmetros, 2 objetivos	Calibração <i>multi-step</i> com SCE-UA
Schoups et al. (2005b)	MOD-HMS	10 parâmetros, 3 objetivos	SCEM-UA, MOSCEM-UA
Muleta & Nicklow (2005)	SWAT	16 parâmetros, 2 objetivos	Análise de sensibilidade, AG, GLUE
Khu & Madsen (2005)	MIKE 11/NAM	9 parâmetros, 4 objetivos	NSGA-II com ordenamento de preferência Pareto (POGA)
Schoups et al. (2005a)	Integrated surface groundwater model	10 parâmetros, 4 objetivos	MOSCEM-UA

Cheng et al. (2005a)	Xinanjia	16 parâmetros, 3 objetivos	AG em série e paralelo
Engeland et al. (2006)	Ecomag	10 parâmetros, 7 objetivos	MOCOM-UA
Khu et al. (2006)	BEMUS	10 parâmetros, 8 objetivos (4 obj, 2 pontos)	POGA
Tang et al. (2006)	SAC-SMA	13 parâmetros, 2 objetivos	NSGA-II, SPEA-II, MOSCEM-UA
Tang et al. (2006)	Integrated subsurface model	13 parâmetros, 2 objetivos	NSGA-II, SPEA-II, MOSCEM-UA
Kunstmann et al. (2006)	Alpine catchment WaSiM	37 parâmetros, 8 objetivos	PEST
Pierro et al. (2006)	SWMM	8 parâmetros, 2 objetivos	Não especificado
Bravo et al. (2007)	WIN_IPH2	7 parâmetros, 2 objetivos (7 opções)	MOCOM-UA
Rouhani et al. (2007)	SWAT	10 parâmetros, 5 objetivos	Calibração manual
Moussa et al. (2007)	ModSpa	5 parâmetros, 7 objetivos	Calibração manual objetivo único e <i>multi-site</i>
De Vos & Rientjes (2007)	HBV	10 parâmetros, 3 objetivos	NSGA-II
Bekele & Nicklow (2007)	SWAT	16 parâmetros, 2 objetivos	NSGA-II
Tang et al. (2007)	SAC-SMA	13 parâmetros, 2 objetivos	Implementações em série e paralelas do ϵ -NSGA-II
Confesor & Whittaker (2007)	SWAT	139 parâmetros, 2 objetivos	NSGA-II
Parajka et al. (2007)	HBV modificado	14 parâmetros, 2 objetivos	SCE-UA ponderado, MOSCEM-UA
Kim et al. (2007)	HSPF	11 parâmetros, 6 objetivos	Calibração manual e automática, utilizando PEST
Fenicia et al. (2007a)	FLEX	8 a 11 parâmetros, 3 objetivos	MOSCEM-UA, SCA
Fenicia et al. (2007b)	HBV-96	9 parâmetros, 2 objetivos	MOSCEM-UA
Efstratiadis et al. (2008)	HYDROGEIOS	99 parâmetros, 40 objetivos	Híbrido, utilizando o método <i>annealing-simplex</i>
Khu et al. (2008)	MIKE-SHE	11 parâmetros, 5 a 9 objetivos	POGA
Feyen et al. (2008)	LISFLOOD	9 parâmetros, 3 objetivos	SCEM-UA
Moussa & Chahinian (2009)	<i>Lumped, two-reservoir-Layer model</i>	7 parâmetros, 1 a 3 objetivos resultantes de 6 critérios	Método de agregação <i>Multi-step</i>

Zhang et al. (2010)	SWAT	16 parâmetros, 4 objetivos	AMALGAM, NSGA II, SPEA II
Li et al. (2010)	General Watershed Loading Function (GWLF) watershed model	16 parâmetros, 3 funções objetivo ponderadas	Método que combina otimização multiobjetivo e media de locais múltiplos de calibração

Fonte: Efstratiadis & Koutsoyiannis (2010), modificado.

Neste trabalho, a determinação dos parâmetros de calibração do modelo foi realizada pelo método NSGA II, que é o algoritmo genético multiobjetivo elitista mais difundido no meio científico. Estudos demonstraram que o método é no mínimo tão bom quanto, ou melhor, que outras técnicas multiobjetivo de segunda geração (Coello et al., 2002; Deb et al., 2000).

O método foi proposto por Deb et. al. (2000), e busca reduzir o tempo computacional exigido pela versão anterior do método (NSGA I – Srinivas & Deb, 1994), além de torná-lo elitista e melhorar a diversidade das soluções. O elitismo é aplicado pela união da população modificada pelos operadores genéticos com a população anterior, sendo escolhidas as melhores soluções do conjunto total. A diversidade das soluções é expressa através da seleção baseada nas maiores “distâncias de multidão” das soluções, que favorece a escolha das soluções mais distanciadas umas das outras. A metodologia do método NSGA II será descrita no item 4.2.1.

3.4 Calibração do SWMM

A calibração do SWMM, mais especificamente, tem sido discutida por pesquisadores do mundo todo, dadas as potencialidades desse modelo. A seguir será apresentado um resumo do estado da arte envolvendo a calibração do SWMM.

Baffaut & Delleur (1989) desenvolveram um procedimento de estimação de parâmetros do SWMM, aplicado ao módulo *Runoff*. O procedimento foi baseado no que eles denominaram “regras de produção”, que consistem de uma sequência de regras computacionais do tipo “if – then”, ou seja, uma tentativa de calibrar considerando as condições de contorno do problema. Por exemplo, se o modelo apresentar uma vazão de pico menor que a observada, uma regra é aplicada para reduzir a rugosidade do canal. Como se

pode deduzir, muitas regras são necessárias para que a calibração seja eficiente. Embora as conclusões do trabalho tenham sido bastante positivas, este método é desaconselhável, uma vez que depende sobremaneira das condições estipuladas pelo usuário. Além disso, a interface do modelo de calibração com o SWMM foi realizada externamente, através de arquivos de entrada e saída, demandando grande tempo computacional para leitura e escrita de arquivos, respectivamente.

Warwick & Tadepalli (1991) investigaram a capacidade do SWMM em prever hidrogramas para uma bacia em Dallas, Texas. O principal objetivo desse trabalho foi analisar a habilidade do modelo em realizar a simulação hidrológica da macrodrenagem com o ajuste de apenas dois parâmetros, separadamente: armazenamento em depressões permeáveis e a porcentagem de áreas impermeáveis. A calibração dos parâmetros foi realizada manualmente e os hidrogramas de resposta apresentaram desvios consideráveis quando comparados com os hidrogramas observados. Entretanto, é importante ressaltar que a bacia hidrográfica foi representada de forma simplificada para os três cenários utilizados e apenas dois parâmetros foram devidamente ajustados, através de calibração manual.

Liong et. al. (1991) desenvolveram um modelo de calibração do SWMM denominado KBSWMM (*Knowledge-based Storm Water Management Model*), específico para a bacia de Upper Bukit Timah (UBT), em Singapura. A metodologia aplicada é baseada em uma análise de sensibilidade prévia de 10 parâmetros, avaliados individualmente, e em duas funções objetivo, sendo expressões dos erros relativos do volume total escoado e da vazão de pico. A sensibilidade de cada parâmetro é expressa através de uma função polinomial. A partir dos hidrogramas observado e simulado, o calibrador identifica qual dos objetivos se encontra mais desajustado. Escolhido o objetivo, o parâmetro de maior influência sobre esse objetivo é escolhido para a calibração. Alterado o valor do parâmetro, as funções objetivo são recalculadas e o procedimento é repetido até que se atinja a precisão estabelecida pelo usuário. Ao calibrar cada parâmetro separadamente, esta metodologia não considerava suas inter-relações. Por essa razão, Liong et al. (1993) desenvolveram um aperfeiçoamento do modelo, denominado KBSWMM2, que utiliza um polinômio de segunda ordem para descrever a influência dos conjuntos de parâmetros sobre a resposta do modelo, considerando suas inter-relações. Os autores concluíram que o modelo KBSWMM2 apresenta desempenho satisfatório.

Liong et. al. (1995) apresentaram uma aplicação de algoritmos genéticos na busca por valores ótimos na calibração de parâmetros. O algoritmo genético (AG) foi utilizado através

de uma interface com o SWMM, utilizando uma única função objetivo, o desvio entre as vazões de pico observada e simulada. A metodologia foi aplicada a uma bacia de Singapura, calibrando oito parâmetros e utilizando seis eventos de chuva: três para calibração e três para verificação. O estudo mostrou que o AG requer apenas um reduzido número de simulações e produz resultados de previsão de pico de vazão com alta precisão. Porém, como discutido anteriormente, a otimização de objetivo único é menos adequada para os problemas de calibração, se comparada à otimização multiobjetivo.

James et. al. (2002) apresentaram uma ferramenta denominada PCSWMM, que, segundo os autores, facilita a calibração do SWMM através do método de otimização dos AGs por objetivo único. Porém, ao se utilizar o software, o que se observa é apenas a troca manual facilitada dos valores dos parâmetros. Com auxílio do software PCSWMM, Wan e James (2002) desenvolveram um método de calibração do módulo Runoff do SWMM, baseado na análise de sensibilidade dos parâmetros. Apenas os parâmetros de elevada influência sobre os resultados do modelo são calibrados. A calibração foi realizada por objetivo único (erro na vazão de pico), aplicada a um evento de chuva hipotético, visando testar o desempenho do processo de calibração desenvolvido. Além de considerar apenas um objetivo, esta metodologia tem a desvantagem de trabalhar com arquivos de interface, o que demanda elevado tempo computacional.

Pierro et. al. (2006) realizaram testes avaliando desde a calibração do SWMM por objetivo único até a calibração multiobjetivo utilizando múltiplos eventos de precipitação. Oito parâmetros foram calibrados a partir de 4 eventos de precipitação, utilizando uma técnica de algoritmos genéticos não especificada. Duas funções objetivo foram avaliadas: erro no volume total escoado e erro na vazão de pico. A técnica proposta para abordagem multievento consiste em formular o problema com $m \times r$ funções objetivo, sendo m o número de critérios (foram adotados 2), e r o número de eventos de precipitação, que devem ser otimizados simultaneamente. A sistemática adotada por esses autores foi testada neste trabalho, com resultados apresentados no item 5.5.

Cho e Seo (2007) calibraram o SWMM para uma bacia na Coreia. Os autores integraram a calibração por AG no código fonte do SWMM, em linguagem Fortran. Para a análise quantitativa, foram calibrados oito parâmetros do módulo *Runoff* e um parâmetro do módulo *Transport*. Para a análise qualitativa, foram calibrados 4 parâmetros do módulo *Runoff*. Foram utilizados 4 eventos de chuva, analisados continuamente, e uma função objetivo, soma dos erros quadrados das vazões. Os parâmetros validados do SWMM foram

utilizados para estimar as cargas de poluentes levadas para o lago Youngrang pela bacia de Jangcheon.

Barco et. al. (2008) estudaram a bacia de Ballona Creek, na Califórnia. Eles aplicaram conhecimentos de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para gerar a distribuição espacial das precipitações no SWMM, e utilizaram um procedimento de otimização denominado *Complex Method* para estimar os parâmetros do modelo. O procedimento foi realizado alterando-se o código fonte do SWMM, em linguagem Fortran. Dez eventos de precipitação foram utilizados para calibração e validação do modelo, sendo ajustados 4 parâmetros. Uma função objetivo foi avaliada, sendo a soma ponderada dos erros no volume total escoado, na vazão de pico e nas vazões instantâneas dos hidrogramas observado e simulado. Os autores concluíram que esta metodologia de integrar SIG e o SWMM com uma técnica de otimização pode ser satisfatoriamente aplicada a grandes bacias hidrográficas urbanas.

No Brasil, Garcia (2005) e Bastos (2007) realizaram a calibração do SWMM por tentativa e erro para a bacia hidrográfica do Arroio Cancela e para as bacias do Alto da Colina e Sítio do Tio Pedro, respectivamente, todas localizadas no município de Santa Maria (RS).

Collodel (2009) avaliou diferentes níveis de detalhamento na representação da bacia hidrográfica do córrego do Gregório, na cidade de São Carlos (SP), empregando o SWMM. Para tanto, realizou a calibração semi-manual do SWMM, utilizando como ferramenta os algoritmos genéticos. O processo de calibração foi dividido em duas etapas: calibração dos parâmetros não variáveis espacialmente e calibração dos parâmetros variáveis espacialmente. Os resultados da calibração mostraram-se satisfatórios, com valores para o coeficiente de eficiência de Nash & Sutcliffe (1970) entre 0,74 e 0,87, variáveis de evento para evento.

O levantamento bibliográfico em torno do assunto calibração do SWMM evidenciou primeiramente o interesse na produção de uma ferramenta que muito pode contribuir com o uso já difundido do modelo. Evidenciou também que poucos são os estudos de calibração automática do SWMM, utilizando algoritmos de otimização multiobjetivo, que constitui foco deste trabalho. A proposta do presente trabalho é inovadora também por introduzir alteração do código fonte do modelo em linguagem C, sem utilização de arquivos de interface, além da possibilidade de consideração de tantas funções objetivo quantas se julgarem necessárias. No item seguinte estão detalhados os procedimentos para o desenvolvimento do calibrador aqui desenvolvido.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho de pesquisa aqui reportado é de natureza computacional. Para o seu desenvolvimento, foram necessárias as seguintes ferramentas:

- SWMM: modelo de simulação hidráulico-hidrológica;
- Microsoft Visual C++ 2008 Express Edition: ferramenta para desenvolvimento de software, utilizada para o desenvolvimento do calibrador e compilação do programa;
- Computadores do Laboratório de Simulação Numérica e da Sala de Ensino Informatizado do departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Descrevem-se a seguir os métodos de desenvolvimento do presente trabalho, que compreenderam cinco etapas principais: desenvolvimento do calibrador, análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo, testes e validação do calibrador desenvolvido. Os testes foram aplicados a dois sistemas diferentes, descritos no item 4.3.

Para melhor entendimento do funcionamento do calibrador, primeiramente são apresentados a caracterização genérica do problema de calibração e o método de otimização adotado, NSGA II, bem como as principais características do simulador utilizado.

4.1 Caracterização do problema de calibração

Neste trabalho, foram adotadas duas funções objetivo para o problema de calibração, embora o calibrador desenvolvido suporte o número de objetivos que se julgar conveniente. Foram adotadas combinações distintas de duas funções objetivo a cada teste, sendo que cada qual expressa de maneira diferente os desvios entre os hidrogramas observado e simulado, conforme explicitadas nos itens 4.5.1 e 4.5.2. Assim, o problema de calibração considerado foi o de minimização de ambas as funções adotadas, para todos os testes.

As variáveis de decisão dos problemas de otimização correspondentes foram caracterizadas como um vetor solução que representa o conjunto de parâmetros da calibração do SWMM. Um exemplo deste vetor é ilustrado na Figura 6. Na cadeia representativa das soluções (vetor), cada elemento possui dois atributos: sua posição e seu conteúdo. A cada posição é associada uma variável de decisão do problema, como descrito na Tabela 3.

Variável 1	Variável 2	Variável 3	Variável 4	Variável 5	Variável 6	Variável 7	...
60	0,02	0,2	0,03	50,0	9,0	4,0	...

Figura 6 – Vetor solução genérico.

Tabela 3 – Variável associada a cada posição do vetor solução.

Posição	variável associada
Variável 1	Porcentagem de áreas impermeáveis
Variável 2	Coefficiente de rugosidade – superfícies impermeáveis
Variável 3	Coefficiente de rugosidade – superfícies permeáveis
Variável 4	Coefficiente de rugosidade - canais
Variável 5	Taxa máxima de infiltração
Variável 6	Taxa mínima de infiltração
Variável 7	Coefficiente de decaimento da infiltração
...	...

Neste trabalho, o número de variáveis de decisão, ou seja, a dimensão do vetor solução, foi estipulado após a análise de sensibilidade de cada sistema avaliado.

Embora a calibração deste trabalho seja expressa em termos de um problema de otimização irrestrita, as suas variáveis de decisão devem assumir valores internos a faixas delimitadas pelos valores limite aceitáveis para os parâmetros, conforme detalhado nos itens 4.5.1 e 4.5.3.

O problema de calibração foi resolvido através do método NSGA II, descrito no item seguinte, e a verificação dos resultados foi realizada com base na visualização dos hidrogramas observado e simulado, e no coeficiente de eficiência de Nash & Sutcliffe (COE) expresso pela Equação 9.

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - \bar{Q})^2} \quad \text{Equação 9}$$

em que:

$Qobs_i$: vazão observada no instante i (ft³/s ou m³/s);

$Qsim_i$: vazão simulada no instante i (ft³/s ou m³/s);

$\bar{Q}$: vazão média observada (ft³/s ou m³/s);

N : número de intervalos de tempo no evento de precipitação.

O método COE foi escolhido para verificação devido à sua vasta aplicação em estudos de calibração hidráulico-hidrológica, visando facilitar a comparação com outros estudos.

4.2 Desenvolvimento do calibrador

O código computacional do calibrador construído implementa o método NSGA II (detalhado no item 4.2.1), com o propósito da identificação automática de valores para os parâmetros do SWMM. Foi escrito em linguagem C, utilizando a ferramenta para desenvolvimento de software Microsoft Visual C++ 2008 Express Edition.

O calibrador foi desenvolvido de forma genérica, visando sua aplicabilidade a diferentes redes de drenagem, conforme detalhado no item 4.2.3.

4.2.1 NSGA II

A metodologia da otimização pelo método NSGA II pode ser resumida nas etapas descritas a seguir.

Etapa 1: Geração da População Inicial

A população inicial de vetores solução foi gerada de forma aleatória, por valores dos parâmetros dentro dos limites pré-estipulados.

Essa população deve ser grande o suficiente para se obter um satisfatório espaço de busca, e pequena o suficiente para evitar um desnecessário desperdício de tempo computacional.

Etapa 2: Avaliação das Funções Objetivo

Para a avaliação das funções objetivo, foi necessária a simulação hidráulico-hidrológica de cada solução, realizada com auxílio do código fonte do SWMM. Com base nos processos adotados pelo SWMM, descritos no item 3.2.1, os hidrogramas resultantes de uma determinada precipitação são gerados para todos os pontos do sistema.

Para o ponto de monitoramento de vazão (onde há disponibilidade de dados observados), o hidrograma observado é comparado com o simulado correspondente, e utilizado no cálculo das funções objetivo. Foram adotadas duas funções objetivo no

procedimento de calibração de cada sistema. Os valores das funções objetivo assim calculados para cada solução são utilizados para sua classificação pelo algoritmo de otimização.

Etapa 3: Classificação da população inicial

Cada vetor solução da população é classificado em frentes de dominância (Figura 7). A frente Fr_1 contém as soluções não-dominadas de toda a população (Pop); Fr_2 contém as soluções não-dominadas do conjunto $Pop - Fr_1$; Fr_3 contém as soluções não-dominadas de $Pop - (Fr_1 \cup Fr_2)$, e assim sucessivamente.

Figura 7 – Frentes de dominância.

Etapa 4: Cálculo da “distância de multidão”

A distância de multidão é calculada para cada solução como sendo o meio perímetro do cubóide formado pelas duas soluções vizinhas mais próximas pertencentes à mesma frente (Figura 8). Reflete quão próximas essas soluções estão. Assim, as soluções extremas segundo cada objetivo terão, por definição, um cubóide infinito.

Figura 8 – Demonstração da distância de multidão.

O perímetro do cubóide é calculado a partir das equações seguintes.

$$DM_{im} = \frac{f_m(x_{i+1}) - f_m(x_{i-1})}{f_m(x_{\max}) - f_m(x_{\min})} \quad \text{Equação 10}$$

$$DM_i = \sum_{m=1}^M DM_{im} \quad \text{Equação 11}$$

Em que:

DM_{im} : distância de multidão;

M : número de funções objetivo consideradas;

i : índice da solução analisada;

m : índice da função objetivo analisada;

$f_m(x)$: valor da função objetivo m para a solução i considerada.

A distância de multidão facilita a escolha das soluções mais dispersas numa mesma frente, assegurando a diversidade das soluções.

Etapa 5: Seleção

A seleção é realizada por torneio entre duas soluções. O par de soluções é selecionado aleatoriamente e comparam-se as frentes e as distâncias de multidão. Uma solução i vence o torneio contra outra solução j quando:

- a solução i está em uma frente de dominação melhor; ou
- se ambas estiverem na mesma frente de dominação, a solução i tem uma distância de multidão maior que a solução j .

Etapa 6: Recombinação

A recombinação é a geração de soluções “filhas” a partir de características de soluções “pais”, combinadas em proporções aleatórias.

O método de recombinação utilizado foi o SBX (Simulated Binary Crossover – Deb & Agrawal, 1995), aplicado a cada parâmetro do par de soluções escolhido, com a probabilidade (Pr).

Este método, como o nome sugere, simula o princípio da recombinação binária (single-point), que utiliza duas soluções “pais” para gerar duas soluções “filhas”. As soluções “filhas” são calculadas a partir das Equações 12 e 13:

$$x_i^{(1,t+1)} = 0,5 \cdot \left[(1 + \beta_{qi}) x_i^{(1,t)} + (1 - \beta_{qi}) x_i^{(2,t)} \right] \quad \text{Equação 12}$$

$$x_i^{(2,t+1)} = 0,5 \cdot \left[(1 - \beta_{qi}) x_i^{(1,t)} + (1 + \beta_{qi}) x_i^{(2,t)} \right] \quad \text{Equação 13}$$

sendo:

x_i^t são as soluções “pais”,

x_i^{t+1} são as soluções “filhas” e

β_{qi} o fator de ponderação calculado a partir da Equação 14.

$$\beta_{qi} = \begin{cases} (2u_i)^{\frac{1}{n_c+1}} & , \text{ se } u_i \leq 0,5; \\ \left(\frac{1}{2(1-u_i)} \right)^{\frac{1}{n_c+1}} & , \text{ se } u_i > 0,5. \end{cases} \quad \text{Equação 14}$$

sendo u_i um número randômico gerado entre 0 e 1 e n_c o índice de distribuição da recombinação. Um valor grande de n_c resulta em uma maior probabilidade de gerar soluções próximas aos pais, enquanto um valor baixo permite que soluções mais afastadas sejam geradas.

Etapa 7: Mutação

A mutação é a substituição do valor de uma das variáveis de decisão da solução, alterando suas características. O valor a ser adotado é também gerado aleatoriamente, dentro dos limites de seu domínio. A probabilidade de mutação (Pm) representa a aceleração da variação populacional.

A mutação polinomial (Deb & Goyal, 1996) foi aplicada a cada parâmetro das soluções, com a probabilidade Pm .

De acordo com esse método, a variável de decisão é modificada segundo a Equação 15:

$$y_i^{(t+1)} = x_i^{(t+1)} + (x_i^u - x_i^l) \bar{\delta}_i \quad \text{Equação 15}$$

em que y_i é a variável resultante da mutação, x_i é o seu valor original (antes da mutação), x^l é o limite inferior do parâmetro, x^u é o limite superior do parâmetro, e $\bar{\delta}_i$ dado por:

$$\bar{\delta}_i = \begin{cases} (2 \cdot r_i)^{1/(\eta_m+1)} - 1 & , \text{ se } r_i < 0,5; \\ 1 - [2 \cdot (1 - r_i)]^{1/(\eta_m+1)} & , \text{ se } r_i \geq 0,5. \end{cases} \quad \text{Equação 16}$$

sendo r_i um número randômico gerado entre 0 e 1 e n_m o índice de distribuição da mutação.

Etapa 8: Formação da nova população

Uma população provisória é gerada unindo-se a população de soluções original ao conjunto de soluções selecionadas, após a aplicação dos operadores genéticos, de forma que ela tenha dimensão igual ao dobro de soluções iniciais.

Para prosseguir com o algoritmo, é necessário que a nova população tenha o mesmo número de indivíduos iniciais. Pelo método da distância de multidão, as soluções que irão compor a nova geração são selecionadas dentro do conjunto da população provisória, até que se atinja o número de soluções iniciais.

O método original do NSGA II prioriza as soluções das melhores frentes, até que se atinja o número de soluções necessário. Neste trabalho, foi utilizado um método alternativo proposto por Deb & Goel (2001), denominado elitismo controlado (Figura 9). Os autores argumentam que o método resulta em melhor convergência que o método original.

Figura 9 – Comparação entre os métodos de elitismo original e controlado.

A diferença fundamental reside no número de indivíduos de cada frente escolhidos para a próxima iteração. No elitismo controlado, este número é restrito como:

$$n_i = r.n_{i-1} \quad \text{Equação 17}$$

sendo n_i é o número máximo permitido de soluções da frente i e r (<1) a taxa de redução, definida pelo usuário.

Sendo k o número de frentes de dominância da população provisória, o máximo número de soluções permitido na frente i será:

$$n_i = N \cdot \frac{1-r}{1-r^k} \cdot r^{i-1} \quad \text{Equação 18}$$

Como $r < 1$, o máximo número permitido de soluções na primeira frente será o maior. Posteriormente, este número reduz exponencialmente a cada frente. Isto assegura a diversidade das soluções, não apenas na mesma frente, mas também em diferentes frentes, sem causar grandes prejuízos à convergência do problema.

Mesmo determinado o número máximo de soluções, pode ocorrer de este número ser ainda maior do que o número de soluções existentes na frente. Neste caso, a diferença resultante deve ser acrescentada à próxima frente.

Etapas 9: Finalização com Critério de Parada

Assim, são gerados novos indivíduos, que devem ser novamente analisados, retornando-se à Etapa 2. O processo iterativo continua até que se atinja o número de iterações estabelecido.

O método NSGA II descrito foi aplicado no desenvolvimento do calibrador, objetivo principal deste trabalho, que está discutido no item seguinte.

4.2.2 Arquivos de entrada e saída do calibrador

O calibrador requer as seguintes entradas: arquivo de entrada do SWMM, arquivo de vazões observadas e arquivo de parâmetros do NSGA II.

O arquivo de entrada do SWMM (de extensão *.inp*) contém todas as informações do sistema de drenagem, e é gerado automaticamente quando se cria um projeto no SWMM. Sua estrutura está resumida no Quadro 1.

Quadro 1 – Estrutura do arquivo de entrada do SWMM.

[TITLE]
Nome do arquivo
[OPTIONS]
Sistema de unidades escolhido
Métodos de infiltração e propagação escolhidos
Intervalo de simulação (data e hora)
[RAINGAGES]
Lista de eventos de chuva
[SUBCATCHMENTS]
Dados das subáreas: identificador, nó de saída, porcentagem de áreas impermeáveis
[SUBAREAS]
Outros dados das subáreas: coeficientes de Manning para áreas permeáveis e não-permeáveis, capacidade de armazenamento para áreas permeáveis, sentido do escoamento
[INFILTRATION]
Dados da infiltração: parâmetros que dependem do modelo escolhido
[JUNCTIONS]
Dados dos nós: cota de fundo, profundidade máxima, profundidade inicial
[OUTFALLS]
Dados específicos dos nós exutórios: tipo, condição de escoamento de saída
[CONDUITS]
Dados dos trechos: nós iniciais e finais, comprimento, coeficiente de rugosidade de Manning, vazão máxima
[XSECTIONS]
Dados da forma das seções dos trechos
[TIMESERIES]
Series temporais utilizadas. Neste programa, dados pluviométricos
[COORDINATES]
Coordenadas dos pontos, polígonos

A estrutura do arquivo de vazões observadas consiste de uma sequência de dados simultâneos de data, hora e vazão observada.

O arquivo de parâmetros do NSGA II apresenta as informações necessárias para o funcionamento desse método de otimização. No Quadro 2 é apresentada a formatação genérica do arquivo. No Apêndice A, encontra-se um exemplo do arquivo de parâmetros do NSGA II.

Quadro 2 – Estrutura do arquivo de entrada do NSGA II.

<p>[PMUT] probabilidade de mutação</p> <p>[PCROSS] probabilidade de recombinação</p> <p>[POP] tamanho da população inicial</p> <p>[ITERACOES] numero máximo de iterações</p> <p>[LIMITES PARAMETROS] Lista de limites inferior e superior de cada parâmetro</p> <p>[CHUVAS] nome dos eventos de chuva a serem simulados</p> <p>[PTOS OBSERVADOS] nome dos trechos de monitoramento de vazão</p> <p>[VAZAO] nome dos arquivos que contêm os dados de vazão, deve ser estritamente na ordem das chuvas e dos pontos de monitoramento de vazão.</p> <p>[FOS] Identificador das funções escolhidas, dentre as implementadas no código.</p>
--

Os arquivos de saída do programa são denominados: *resultados_FOs.txt*, *resultados_Vazoes.txt*, *resultados_Ranks.txt* e *resultados_Estatistica.txt*. O primeiro contém as informações das frentes Pareto formadas a cada iteração, com dados das soluções que as compõe (valores das funções objetivo, distâncias de multidão e parâmetros). O arquivo *resultados_Vazoes.txt* mostra os hidrogramas resultantes das simulações para cada solução que compõe a frente Pareto final, através de valores tabelados. O arquivo *resultados_Ranks.txt* contém o número de frentes de dominância ao final de cada iteração, e o número de soluções em cada frente. Por fim, o arquivo *resultados_Estatistica.txt* contém, para

cada função objetivo, a evolução da média, desvio padrão, e valores extremos (máximo e mínimo) ao longo das iterações.

4.2.3 Código computacional

Como citado anteriormente, o calibrador foi desenvolvido em linguagem C, modificando o código computacional original do SWMM. As alterações estão descritas de forma simplificada na Figura 10.

Figura 10 – Alterações no código computacional do SWMM.

O código original do SWMM é constituído resumidamente pelas funções *swmm_open*, *swmm_start*, *swmm_step*, *swmm_end* e *swmm_close*. As funções *swmm_open* e *swmm_close* são responsáveis pela criação e finalização do projeto no SWMM, e por isso foram mantidas, com algumas alterações, no início e no final do código, sendo executadas apenas uma vez. O algoritmo do NSGA II foi implementado entre estas funções, de forma a reduzir o tempo computacional necessário para a manipulação de arquivos de entrada. As funções *swmm_start*, *swmm_step* e *swmm_end* são responsáveis pela simulação propriamente dita, e portanto foram transferidas para dentro da função *calibrator_run*, pois necessitam ser executadas para cada solução proposta.

Assim, as principais etapas do código computacional desenvolvido estão resumidas no fluxograma da Figura 11, sendo destacadas as funções originais do SWMM utilizadas. O agrupamento de funções pode ser melhor entendido no pseudocódigo do Quadro 3.

Figura 11 – Fluxograma das etapas do código computacional do calibrador.

Quadro 3 – Pseudocódigo do calibrador.

```

main
{
    swmm_open;
    nsgaii_run;      //apresentada a seguir.
    swmm_close;
}

calibrator_run
{
    get_in;
    random_float;    //Etapa 1 do método NSGAI, descrito no item 3.5.1.
    loop iterações   //Etapa 9, quando alcança o número de iterações máximo.
    {
        fitness;     //apresentada a seguir.
        select;      //Etapa 5.
        crossover;    //Etapa 6.
        mutation;     //Etapa 7.
        fitness;
        keepalive;    //Etapa 8.
    }
    printresults;
}

fitness
{
    loop chuvas
    {
        change_rain;
        set_date;
        loop soluções
        {
            set_param;
            set_Qini;
            set_iniDepth;
            project_validate;
            swmm_start;
            swmm_step;
            swmm_end;
            loop pontos de monitoramento de vazão
            {
                get_Qobs;
                get_Qsim;
                get_FOs;    //Etapa 2.
            }
        }
    }
    ranking;          //Etapas 3 e 4.
}

```

O código é iniciado com a função *swmm_open*, que é parte integrante do código do SWMM, responsável por criar um projeto no modelo e abrir os arquivos de entrada e binário. O arquivo de entrada foi descrito no Quadro 1, enquanto o arquivo binário é criado para armazenar as informações de saída do modelo a cada simulação, convertidas em código binário.

No código do SWMM original, a função *swmm_open* incluía também a abertura do arquivo denominado *report*, que armazenaria as informações de saída das simulações. Neste trabalho, este arquivo foi desconsiderado, pois é inviável o armazenamento de todas as informações de saída do modelo, uma vez que um grande número de soluções é testado a cada iteração.

Após abrir o arquivo de entrada do modelo, a função *project_readInput*, interna à rotina *swmm_open*, armazena os dados lidos no arquivo de entrada para variáveis que serão utilizadas ao longo do programa.

A função *calibrator_run* engloba todas as funções entre *swmm_open* e *swmm_close*, sendo iniciada pela função *get_in*. Ela abre o arquivo de entrada *ag_input.in* e armazena as informações relativas ao algoritmo evolutivo, citadas no Quadro 2.

A função *random_float* gera randomicamente os valores para os parâmetros calibráveis do sistema (variáveis de decisão), dentro dos limites especificados. Executa a etapa 1 descrita no item 4.2.1. O número de soluções geradas é estabelecido no arquivo *ag_input.in*. Cada solução gerada é um vetor que contém os valores para as variáveis de decisão do problema, representadas por números reais ao invés de binários, para evitar dificuldades ao lidar com *strings* longos, cuja codificação e decodificação implicaria em tempo computacional elevado.

Os valores são atribuídos às variáveis de decisão na função *fitness*, que corresponde ao agrupamento de todas as funções do lado direito do fluxograma da Figura 11. Esta função é iniciada com um laço para atribuição do evento de chuva. A função *change_rain* atribui a chuva às subáreas do sistema. Ao alterar o evento de chuva, é necessário que se altere também a data e hora de início e final da simulação, através da função *set_date*. Esta alteração deve se dar no formato mm/dd/aaaa, pois é realizada após a atribuição inicial do modelo (em *swmm_open*), quando o programa converte quaisquer unidades para o sistema inglês (sistema imperial). Nesta etapa, é recalculado também o tempo total de simulação.

Após estas alterações, inicia-se o laço para atribuição das soluções. Para cada chuva, várias soluções são testadas dentro deste laço. Cada solução é atribuída ao projeto do SWMM através das funções *set* dos parâmetros. Estas funções atribuem o valor às variáveis utilizadas

pelo SWMM, fazendo as correções necessárias em todas as outras variáveis cujo cálculo depende destes parâmetros. Por exemplo, ao adotar um novo valor do coeficiente de rugosidade de Manning dos canais, é preciso recalcular o raio hidráulico para cada nível de água do perfil do canal, pois este fora calculado com base na fórmula de Manning, que é uma função de n . Para o modelo de infiltração de Horton, verifica-se se a taxa mínima de infiltração é menor que a taxa máxima de infiltração e, em caso contrário, promove-se a troca de valores de maneira a torná-los compatíveis com as premissas do método.

A função *set-Qini* atribui a vazão de base aos trechos do projeto do SWMM. A vazão de base é um parâmetro de entrada do modelo que não foi calibrado, mas calculado a partir do valor de vazão observado no exutório da bacia. Com este valor, foi calculada a vazão específica (q) da bacia total, pela Equação 19:

$$q = \frac{Q_{obs}}{A} \quad \text{Equação 19}$$

Em que:

q = vazão específica da bacia hidrográfica (m/s);

Q_{obs} = vazão no exutório (m³/s);

A = área total da bacia hidrográfica (m²).

De posse desses valores foram calculadas as vazões de base para os trechos de canal, multiplicando a vazão específica da bacia pela área de contribuição referente ao nó inicial de cada trecho, através da Equação 20.

$$Q_b = q \cdot A_i \quad \text{Equação 20}$$

Sendo:

Q_b = vazão de base no trecho de canal ou no nó (m³/s);

q = vazão específica da bacia hidrográfica (m/s);

A_i = Área de contribuição referente ao nó de início do trecho (m²).

Atribuindo-se este valor ao parâmetro *Initial_flow* dos trechos, a simulação é iniciada com o valor estimado de vazão de base, mas esta vazão não é mantida ao longo do tempo, decaindo em caso de ausência de precipitação por algum período. Para solucionar este problema, uma entrada constante de vazão (*Inflow*) no nó anterior do trecho foi adotada, referente ao valor proporcional à área de concentração deste nó.

Antes da simulação, ainda é necessário ajustar o valor da profundidade inicial de água nos nós do sistema. No caso da macrodrenagem, os nós são apenas as junções dos afluentes, e portanto a profundidade nos nós é igual à profundidade de água nos trechos. A função *set_IniDepth* realiza este procedimento, utilizando a equação de Manning e o perfil do canal.

Ajustados todos os parâmetros do sistema, inicia-se a simulação com o SWMM, com a função *project_validate*, que valida os dados anteriormente atribuídos, seguida da função *swmm_start*, *swmm_step* e *swmm_end*, constituintes do código do SWMM original. As funções *swmm_start* e *swmm_end* são responsáveis pela inicialização e finalização da simulação corrente. A função *swmm_step* é a que executa a simulação do SWMM propriamente dita, calculando a transformação chuva-vazão, a infiltração e a propagação do escoamento, gerando o valor da vazão no exutório ao final do intervalo de tempo. A função é apresentada dentro de um laço para atribuição do tempo de simulação, com base nos valores de data e hora de início e final da simulação, que foram previamente atribuídos na função *set_data*.

Após estas etapas, os dados de vazão simulada já foram calculados em todo o sistema, para o evento de chuva e a solução corrente. Porém os dados de interesse são apenas aqueles passíveis de comparação com os dados de vazão observada. Assim, os dados observados são assimilados previamente através da função *get_Qobs*, dentro de um laço do número de pontos de monitoramento de vazão. Esta função armazena os valores de vazão observada em uma estrutura de dados que contém informações de data, hora e vazão.

Posteriormente, a vazão simulada é assimilada nesta mesma estrutura através da função *get_Qsim*, somente para os instantes e trechos em que existem vazões observadas para comparação. Esta função também calcula o volume total escoado e a vazão de pico.

A função *get_FOs* corresponde à etapa 2 do método NSGA II, calculando os valores das funções objetivo (FOs) com base nas vazões observada e simulada.

Após a execução da função *get_FOs*, são fechados os laços para atribuição de pontos de monitoramento de vazão, de soluções e de eventos de chuva, ou seja, todo este procedimento é repetido diversas vezes antes da etapa seguinte, a classificação das soluções.

A função *ranking* classifica as soluções em frentes de dominância e calcula as distâncias de multidão, conforme os conceitos descritos no item 4.2.1 (Etapas 3 e 4), comparando os valores das funções objetivo. Esta função também avalia o número de frentes de dominância e o número de indivíduos em cada frente.

Após a execução da função *fitness*, o código segue com a função *select* (Etapa 5 do método NSGA II). Esta forma uma nova população, selecionando soluções da população anterior através do método denominado torneio de duas soluções. Duas soluções são sorteadas aleatoriamente com reposição, e a melhor delas é selecionada para aplicação da recombinação e da mutação. Esse procedimento é repetido até que a nova população seja completada.

A função *crossover* (Etapa 6 do método NSGA II) realiza a recombinação entre pares de soluções escolhidas na função anterior. O método de recombinação utilizado foi o SBX (Simulated Binary Crossover – Deb & Agrawal, 1995), aplicado a cada parâmetro do par de soluções escolhido, sob uma probabilidade de recombinação (Pr), conforme descrito no item 4.2.1.

A função *mutation* (Etapa 7 do método NSGA II) é então aplicada a cada parâmetro das soluções, segundo a metodologia polinomial de Deb & Goyal (1996), sob a probabilidade de ocorrência estabelecida.

Ao alterar alguns dos parâmetros das soluções através da recombinação e da mutação, é necessário que se aplique novamente a função *fitness*, para recalcular as vazões observadas resultantes das simulações com novos parâmetros, além dos novos valores de FOs.

A função *keepalive* (Etapa 8 do método NSGA II) é responsável por formar a população para a próxima iteração. Ela é iniciada pela união da população alterada pela recombinação e mutação com a população inicial, seguida de uma nova classificação geral e cálculo da distância de multidão. Ainda nesta função, são aplicados os princípios do elitismo controlado, para formar a nova população, que irá para a próxima iteração.

O procedimento é repetido a partir da primeira aplicação da função *fitness*, fechando o laço até que o número de iterações máximo seja atingido (Etapa 9 do método NSGA II).

Finalizadas as iterações, os resultados são impressos separadamente em arquivos *.txt*, de forma a facilitar a análise posterior dos resultados.

A última função é a função *swmm_close*, parte integrante do código do SWMM, que é responsável pelo fechamento de todos os arquivos abertos e finalização do projeto.

4.3 Dados utilizados nos testes do calibrador

Como a confiabilidade do calibrador construído está associada à sua capacidade de determinação de valores para os parâmetros do modelo, entende-se que ele deva ser testado

para diversos sistemas. No caso, os testes foram restritos à disponibilidade de dados de monitoramento simultâneo de chuva e vazão.

Um teste importante para avaliar os métodos de calibração automática é aplicar o calibrador a um sistema com parâmetros conhecidos. O sistema é previamente simulado no SWMM, e os hidrogramas gerados como resposta são posteriormente utilizados como séries de vazões “observadas” para o procedimento de calibração. Os parâmetros do sistema são então alterados para verificação da eficiência do calibrador. Este procedimento foi realizado utilizando o sistema de drenagem disponibilizado no pacote de instalação do SWMM, descrito no item 4.3.1.

Posteriormente, outros testes foram realizados visando verificar a aplicabilidade do calibrador, incluindo a calibração de um sistema real (bacia do córrego do Gregório, descrita no item 4.3.2).

4.3.1 Bacia exemplo do SWMM

O sistema exemplo hipotético disponibilizado juntamente com o pacote de instalação do SWMM aqui utilizado é composto por 8 subáreas de drenagem, 13 nós, 1 exutório e 13 condutos circulares (Figura 12), cujas características são apresentadas no arquivo de entrada “Example1.inp”, juntamente com dados de um evento de chuva.

Figura 12 – Bacia exemplo.

O modelo foi executado no SWMM para produzir os hidrogramas dos condutos 8 e 10, escolhidos para a comparação das vazões. Os hidrogramas assim produzidos foram adotados como séries de vazões “observadas” para essa bacia exemplo.

4.3.2 Bacia do córrego do Gregório

A bacia do córrego do Gregório é uma das principais bacias hidrográficas da cidade de São Carlos, SP. Com 5,8 km de comprimento axial, ela drena aproximadamente 10,1 km² de área, dos quais 60% correspondem a áreas urbanas e 40% a áreas rurais. A parcela da bacia do córrego do Gregório analisada neste estudo é delimitada em vermelho (Figura 13).

Figura 13 – Bacia do córrego do Gregório (Fonte: Collodel, 2009).

O presente estudo empregou os dados relativos à configuração 5 adotada por Collodel (2009), em que foram admitidos apenas canais naturais de drenagem das diversas sub-bacias. Esse sistema possui 52 sub-bacias, 17 nós, um exutório e 17 canais, conforme indicações da Figura 14. No Apêndice B encontra-se o detalhamento das informações referentes à bacia do córrego do Gregório de interesse neste estudo.

Figura 14 – Representação da bacia do córrego do Gregório no SWMM.

A seção escolhida como exutório corresponde ao ponto onde se situava o posto pluviométrico da bacia do córrego do Gregório, monitorada pelo NIBH (Núcleo Integrado de Bacias Hidrográficas).

As seções transversais dos canais naturais foram levantadas por Collodel (2009) e Lima et al. (2007), totalizando 5 seções no córrego do Gregório, e 2 seções em cada córrego secundário, Invernada e Lazarini, conforme indicações da Figura 15.

Figura 15 – Localização das seções transversais (Fonte: Collodel, 2009).

Os perfis transversais dos córregos adotados foram obtidos a partir da interpolação das seções levantadas. As seções transversais resultantes da interpolação das seções avaliadas em campo para o córrego do Gregório e seus afluentes são apresentadas no Anexo A. Na Figura 16 são indicadas as seções adotadas ao longo da bacia.

Figura 16 – Distribuição das seções adotadas no sistema (Fonte: Collodel, 2009).

Os dados de precipitação e nível utilizados foram obtidos do monitoramento realizado entre janeiro de 2004 e dezembro de 2006 pelo NIBH, do Departamento de Hidráulica e Saneamento, da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A escolha dos eventos a serem utilizados na modelagem foi feita com base na análise de coerência entre as chuvas e os respectivos hidrogramas observados. Foram analisados 57 eventos com precipitação total mínima de 10 mm (Anexo B), tendo sido escolhidos os eventos descritos na Tabela 4. Os eventos 3, 27, 35 e 53 foram utilizados para a análise de sensibilidade da bacia do Gregório. Na calibração, foram utilizados os eventos 3, 27 e 49, enquanto os demais eventos foram utilizados na validação dos dados calibrados. A escolha dos eventos para calibração priorizou eventos temporalmente espaçados e com períodos de retorno bastante variados, de forma a produzir resultados mais generalizados.

Tabela 4 – Caracterização dos eventos escolhidos.

Evento	Data	Duração (min)	Precipitação total (mm)	Intensidade média (mm/h)	Período de retorno (anos)
3	14/02/2004	377	36,2	5,76	1,05
4	14/02/2004	206	15,1	4,4	0,03
7	22/02/2004	663	29,3	2,65	0,34
12	23/05/2004	47	30,5	38,94	2,44
15	19/07/2004	141	15,8	6,72	0,05
17	17/10/2004	321	21,9	4,09	0,13
27	16/03/2005	342	58,0	10,18	8,07
30	24/05/2005	107	24,0	13,46	0,38
35	07/10/2005	172	40,5	14,13	2,52
40	06/11/2005	46	17,7	23,09	0,25
46	10/02/2006	583	36,8	3,79	0,94
48	13/02/2006	172	13,3	4,64	0,02
49	15/02/2006	206	41,2	12,0	2,44
55	26/06/2006	62	12,9	12,48	0,05

A Tabela 4 também apresenta, para cada evento:

- Duração do evento (min);
- Precipitação total (mm);
- Intensidade média: razão entre a precipitação total e a duração da chuva (mm/h);
- Período de retorno (anos), determinado com base na equação de chuvas intensas da cidade de São Carlos apresentada por Barbassa (1991):

$$i_{média} = \frac{1519T_r^{0,236}}{(16+d_c)^{0,935}} \quad \text{Equação 21}$$

sendo:

$i_{média}$: intensidade média da chuva (mm/h);

T_r : período de retorno (anos);

d_c : duração da chuva (min).

Os dados de nível observados foram transformados nas respectivas vazões com base na curva-chave do córrego (Equação 22) proposta por Lima et al. (2007):

$$Q_{obs} = 8,278h^{2,2517} \quad \text{Equação 22}$$

Em que:

Q_{obs} : vazão no exutório (m³/s);

h : nível de água na seção (m).

4.4 Análise de sensibilidade

Antes da calibração, foi realizada a análise de sensibilidade para cada sistema adotado, para determinar quais parâmetros exercem maior influência sobre os resultados do modelo, e portanto necessitam ser calibrados.

Para a bacia exemplo do SWMM, os parâmetros avaliados na análise de sensibilidade foram: porcentagem de áreas impermeáveis (AI), coeficiente de rugosidade de Manning para áreas impermeáveis (NI) e permeáveis (NP), capacidade de armazenamento em áreas impermeáveis (SI) e permeáveis (SP), porcentagem de áreas impermeáveis sem depressão de armazenamento (Z), coeficiente de rugosidade de Manning para condutos (n) e os parâmetros de infiltração de Horton (I0, Ib e k).

Para a bacia do córrego do Gregório, além dos parâmetros acima citados, testou-se a influência da largura (W) e a declividade (S) das sub-bacias, sobre as respostas do modelo.

Cada parâmetro foi avaliado separadamente, com exceção dos parâmetros de infiltração, enquanto os demais foram mantidos constantes. A variação foi de -90 a +90% de seu valor inicial, e sua influência sobre o modelo foi calculada em termos de variações na vazão de pico e no volume total escoado.

Para a bacia exemplo do SWMM, foi simulado apenas um evento de precipitação, enquanto para a bacia do córrego do Gregório foram escolhidos eventos diversificados (com períodos de retorno variados) para analisar o comportamento do sistema submetido a diferentes precipitações, sendo realizada a média das influências.

4.5 Testes

Na Tabela 5 é apresentado um resumo dos testes realizados e os sistemas utilizados.

Tabela 5 – Sistemas utilizados nos testes do calibrador.

Teste	Bacia
Calibração da bacia exemplo do SWMM	Exemplo do SWMM
Conjunto de funções objetivo	Exemplo do SWMM
Calibração da bacia do córrego do Gregório	Córrego do Gregório
Avaliação multievento	Córrego do Gregório

A calibração da bacia exemplo do SWMM pode ser considerada como um teste de eficiência do calibrador, devido ao fato deste sistema não apresentar as incertezas inerentes às medições reais.

O teste de diferentes conjuntos de funções objetivo também foi realizado para a bacia exemplo, por tratar-se de um sistema de menor dimensão e, portanto, requerer menor tempo computacional para a calibração. Tornou-se viável assim investigar as diversas combinações dentre as funções objetivo candidatas.

Comprovada a eficiência do calibrador construído, este foi aplicado a um sistema real, a bacia do córrego do Gregório, localizada no município de São Carlos, SP.

Por fim, a avaliação multievento, que visa verificar a melhor forma de considerar diferentes eventos de precipitação no processo de calibração, foi realizada para a bacia do córrego do Gregório.

4.5.1 Calibração da bacia exemplo do SWMM

O calibrador foi desenvolvido de forma genérica, facilitando a troca de especificações adotadas.

Para a calibração da bacia exemplo do SWMM, foram adotadas as seguintes especificações:

- Tamanho da população inicial: 200 soluções;
- Probabilidade de recombinação: 0,7. Segundo Deb (2001), deve estar na faixa de 0,5 e 1,0;
- Probabilidade de mutação: 0,07. Segundo Deb (2001), esse valor deve estar na faixa de 0 e 1/número de parâmetros a serem calibrados.
- Número máximo de iterações: 200 para testes preliminares e 500 para o teste final.

Os valores limite para os parâmetros a serem calibrados foram estipulados como porcentagens acima e abaixo do valor inicial do parâmetro, conforme a Tabela 6. Foram realizados 5 testes, com diferentes faixas de valores, visando verificar a eficiência do calibrador.

Tabela 6 – Limites dos parâmetros no teste de eficiência do calibrador.

Teste	Faixa de valores
1	-20% a +20%
2	-50% a +50%
3	-80% a +80%
4	-90% a +90%
5	-100% a +100%

Três funções objetivo foram utilizadas para o teste de eficiência do calibrador, combinadas duas a duas, de forma a compor dois grupos de experimentos (Tabela 7): grupo A, utilizando as funções FO1 (Equação 23) e FO2 (Equação 24), e grupo B, utilizando as funções FO1 e FO3 (Equação 25).

Tabela 7 – Funções utilizadas nos grupos de testes.

Grupo	Faixa de valores
A	FO1 e FO2
B	FO1 e FO3

$$FO1 = \sum_{j=0}^m \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Qobs_{ji} - Qsim_{ij})^2 \right) \quad \text{Equação 23}$$

$$FO2 = \sum_{j=0}^m \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Qobs_{ji} - Qsim_{ij})^2}{(Qobs_{ij} - \bar{Q})^2} \right) \quad \text{Equação 24}$$

$$FO3 = \sum_{j=0}^m \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{Qobs_{ji}} - \frac{1}{Qsim_{ij}} \right)^2 \right) \quad \text{Equação 25}$$

em que:

$Qobs_{ji}$: vazão observada no instante i , para o ponto de monitoramento de vazão j (ft³/s);

$Qsim_{ij}$: vazão simulada no instante i , para o ponto de monitoramento de vazão j (ft³/s);

$\bar{Q}$: vazão média observada (ft³/s);

N : número de intervalos de tempo no evento de precipitação;

m : número de pontos de monitoramento de vazão.

As funções objetivo foram avaliadas em dois pontos de monitoramento de vazão, localizados nos trechos 10 e 8, e um evento de chuva disponível no sistema.

O critério de parada do processo iterativo foi adotado como 500 iterações para os experimentos do grupo A. Verificou-se, entretanto, que a convergência se deu muito antes da centésima iteração, permitindo que 100 iterações fossem adotadas para os testes do grupo B.

4.5.2 Conjunto de funções objetivo

A escolha adequada de uma função objetivo não é uma tarefa simples, e depende sobremaneira do uso futuro do modelo hidrológico. Existem funções que priorizam a aproximação do pico dos hidrogramas observado e simulado, enquanto outras tendem a aproximar o hidrograma a cada intervalo de tempo, ou ainda aproximar as vazões de estiagem. Não existe um critério definido para a seleção de uma função objetivo, tornando o processo bastante subjetivo. Vários estudos foram desenvolvidos visando demonstrar a influência da escolha da função objetivo sobre os valores dos parâmetros calibrados (Green & Stephenson, 1986; Tassi et al., 2006; Porto et al., 2008).

Excetuando-se as três anteriormente citadas, que foram utilizadas exclusivamente para verificar a eficiência do calibrador, foram analisadas onze funções objetivo candidatas para a escolha do conjunto de funções mais adequado, após análise das possíveis combinações duas a duas. Esse teste foi realizado com a rede exemplo do SWMM, por ser um sistema mais simplificado, e, portanto, que demanda menor tempo computacional.

Todas as funções analisadas são de minimização e expressões são apresentadas nas Equações 26 a 36. A primeira função (F1) é uma adaptação do coeficiente de Nash & Sutcliffe (1970), um critério de avaliação largamente utilizado em pesquisas hidrológicas. A segunda função a ser adotada (F3) prioriza a minimização dos erros das vazões de grande magnitude, indicada quando o objetivo é estudar problemas de inundações ou dimensionamentos de tubulações de drenagem. Ao contrário da função anterior, a F4 prioriza a minimização dos erros das vazões de pequena magnitude, indicada quando o objetivo é estudar problemas de estiagem. F2 é conhecida como erro médio quadrático relativo, e possui um divisor para tornar adimensional a função. As funções F8, F9 e F7 são variações das funções F3, F4 e F2, respectivamente, retirando-se multiplicador (1/N), utilizado para possibilitar a comparação de eventos com diferentes números de intervalos de tempo de medição. Se o valor de N for grande, a otimização da função pode ser um pouco retardada. A função F10 representa a diferença nas vazões de pico observada e simulada. A função F11 é referente à diferença no volume total escoado observado e simulado. As funções F5 e F6 são variações das funções F10 e F11, com elementos adimensionalizadores.

$$F_1 = \frac{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - \bar{Q})^2}$$

Equação 26

$$F_2 = \left(\frac{1}{N} \right) \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{Qobs_i - Qsim_i}{Qobs_i} \right)^2 \quad \text{Equação 27}$$

$$F_3 = \left(\frac{1}{N} \right) \cdot \sum_{i=1}^N (Qobs_i - Qsim_i)^2 \quad \text{Equação 28}$$

$$F_4 = \left(\frac{1}{N} \right) \cdot \sum_{i=1}^N \left| \left(\frac{1}{Qobs_i} - \frac{1}{Qsim_i} \right) \right| \quad \text{Equação 29}$$

$$F_5 = \left| \frac{Qp_{sim} - Qp_{obs}}{Qp_{obs}} \right| \quad \text{Equação 30}$$

$$F_6 = \left| \frac{Vt_{sim} - Vt_{obs}}{Vt_{obs}} \right| \quad \text{Equação 31}$$

$$F_7 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Qobs_i - Qsim_i}{Qobs_i} \right)^2 \quad \text{Equação 32}$$

$$F_8 = \sum_{i=1}^N (Qobs_i - Qsim_i)^2 \quad \text{Equação 33}$$

$$F_9 = \sum_{i=1}^N \left| \left(\frac{1}{Qobs_i} - \frac{1}{Qsim_i} \right) \right| \quad \text{Equação 34}$$

$$F_{10} = |Qp_{sim} - Qp_{obs}| \quad \text{Equação 35}$$

$$F_{11} = |Vt_{sim} - Vt_{obs}| \quad \text{Equação 36}$$

Em que:

$Qobs_i$: vazão observada no final do passo de tempo i (m³/s ou ft³/s);

$Qsim_i$: vazão simulada no final do passo de tempo i (m³/s ou ft³/s);

$\bar{Q}$: média das vazões observadas (m³/s ou ft³/s);

n : número de intervalos de tempo do evento analisado;

Qp_{obs} : vazão de pico observada (m³/s ou ft³/s);

Qp_{sim} : vazão de pico simulada (m³/s ou ft³/s);

Vt_{obs} : volume total escoado observado (m³ ou ft³);

Vt_{sim} : volume total escoado simulado (m³ ou ft³).

As funções foram combinadas 2 a 2, resultando em 55 combinações diferentes, segundo a Equação 37.

$$C_{11,2} = \binom{11}{2} = \frac{11!}{2!(11-2)!} = 55 \text{ combinações} \quad \text{Equação 37}$$

Cada combinação foi simulada 5 vezes, utilizando-se a média das repetições para posterior análise.

Os testes tiveram como objetivo minimizar simultaneamente duas funções. De posse da frente Pareto resultante, o ponto mais próximo à origem foi utilizado para calcular as demais funções, não otimizadas na simulação.

As combinações foram avaliadas conforme a métrica da Distância Euclidiana. O referido método calcula a distância entre um ponto da frente Pareto (mais próximo à origem) e o ponto “ótimo”, segundo a Equação 38. Neste caso, em que o problema é de minimização sem restrições, entende-se como ponto “ótimo” a origem dos eixos.

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^m (f_i - f_i^*)^2} \quad \text{Equação 38}$$

Sendo:

m : número de funções objetivo;

f_i : valor da função objetivo i do melhor ponto da frente Pareto, padronizada em relação ao maior valor;

f_i^* : valor da função objetivo i no ponto ótimo, padronizada em relação ao maior valor.

O número de funções objetivo m é dado como 11, e portanto a melhor combinação é aquela que gera resultados satisfatórios a todas as funções, com compensações aceitáveis.

Assim, as diferentes combinações puderam ser avaliadas (distância Euclidiana), sendo escolhida aquela de menor nota.

4.5.3 Calibração da bacia do córrego do Gregório

As especificações adotadas para a calibração da bacia do córrego do Gregório foram as mesmas adotadas na calibração da bacia exemplo do SWMM, com exceção dos limites dos parâmetros.

A bacia do córrego do Gregório foi dividida de forma simplificada em áreas urbanas e rurais (Figura 17), com base na inspeção visual das imagens fornecidas pelo Centro de Divulgação Científica e Cultural (CDCC, 2010). Por isso, o parâmetro AI foi duplicado, sendo que AI1 corresponde à porção rural da bacia e AI2 corresponde à porção urbana.

Figura 17 – Áreas urbanas e rurais na bacia do córrego do Gregório.

Os limites para o parâmetro AI foram adotados de forma a considerar faixas condizentes à realidade rural e urbana da bacia.

Os limites dos demais parâmetros foram estipulados como porcentagens abaixo e acima de um valor inicial, obtido de Collodel (2009). A largura e a declividade de cada subárea e os valores de rugosidade de Manning para os canais são parâmetros espacialmente variáveis. Neste trabalho, foram calibrados multiplicadores do valor inicial adotado para cada subárea, dentro do limite de -20 a +20%. Para os coeficientes de rugosidade de Manning das superfícies, foram adotados limites de -50 a +50% do valor inicial para esta bacia. Os limites dos parâmetros de infiltração de Horton foram escolhidos a partir de intervalos de -100 a +100% do valor inicial.

Todos os limites de parâmetros foram analisados conforme os intervalos de valores sugeridos no manual do SWMM (Rossman, 2009), sendo adotado sempre o valor mais restritivo. Assim, os limites foram estabelecidos como porcentagens sobre um valor inicial, exceto quando este limite extrapolou os valores sugeridos no manual do SWMM, resultando nos valores apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Limites inferior e superior dos parâmetros de calibração.

Parâmetro		Sigla	Limite inferior	Limite superior
Porcentagem de áreas impermeáveis – áreas rurais		AI1	0	10
Porcentagem de áreas impermeáveis – áreas urbanas		AI2	40	100
Multiplicador da largura		mW	0,8	1,2
Multiplicador da declividade		mS	0,8	1,2
Coeficiente de rugosidade de Manning para áreas impermeáveis		NI	0,010	0,03
Coeficiente de rugosidade de Manning para áreas permeáveis		NP	0,1	0,25
Horton	Taxa máxima de infiltração (mm/h)	I0	8,0	44,14
	Taxa mínima de infiltração (mm/h)	Ib	2,5	22,0
	Constante de decaimento (h^{-1})	K	2,0	7,0
Multiplicador do coeficiente de rugosidade de Manning para canais		mn	0,8	1,2

4.5.4 Abordagem multievento

Múltiplos eventos podem ser considerados na calibração de um sistema de diversas maneiras. Neste trabalho, foram avaliados 4 abordagens diferentes, aqui denominadas tradicional, de Dayaratne, média das FOs e de Pierro. Cinco repetições foram realizadas para cada uma das referidas abordagens, sendo escolhida aquela que gerou melhores resultados.

Nas duas primeiras abordagens citadas, a calibração dos eventos é realizada separadamente, ou seja, o procedimento de calibração é repetido para cada evento de chuva considerado. A diferença reside no modo adotado para combinar os resultados. Usualmente, uma média dos valores dos parâmetros resultantes da calibração dos eventos é adotada; esta metodologia foi aqui denominada tradicional. Dayaratne & Perera (2004) propõem outro método, de acordo com o qual os valores dos parâmetros resultantes da calibração de cada evento é simulado nos demais. O resultado final é aquele que produziu melhor resposta considerando todos os eventos.

As abordagens denominadas média das FOs e de Pierro consideram simultaneamente todos os eventos na etapa de calibração, ou seja, o procedimento de calibração é realizado apenas uma vez. Uma abordagem bastante simplificada proposta aqui é a consideração da média das FOs de todos os eventos na etapa de calibração do sistema. Assim, a cada iteração são escolhidas aquelas soluções que melhor representam todos os eventos, igualmente ponderados. Pierro et al. (2006) apresentam um método de acordo com o qual são calculadas $m \times r$ funções objetivo, sendo m e r os números de critérios de avaliação e eventos de

precipitação, respectivamente. A calibração é realizada considerando-se todos os eventos simultaneamente, gerando uma frente Pareto de $m \times r$ dimensões.

As principais diferenças entre as referidas abordagens é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Diferenças entre as abordagens multievento.

Abordagem	Número de calibrações	Modo de escolha dos parâmetros	Número de FOs na calibração
Tradicional	r	média dos valores em todos os eventos	m
Dayaratne	r	melhor valor dentre todos os eventos	m
Média das FOs	1	direta	m
Pierro	1	direta	$m \times r$

Sendo m o número de critérios de avaliação e r o número de eventos de precipitação.

4.6 Validação

A validação tem por objetivo avaliar a capacidade do calibrador implementado em gerar resultados próximos à realidade, comprovando sua eficiência. Neste trabalho, a validação foi realizada através da simulação de eventos diversificados da bacia do córrego do Gregório. A verificação foi realizada por meio da comparação visual entre os hidrogramas observado e simulado, e do coeficiente de eficiência de Nash & Sutcliffe obtido.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos durante as análises e testes executados, na ordem em que foram realizados.

5.1 Análise de sensibilidade

Nas Figuras 18 e 19 é apresentada a análise de sensibilidade dos parâmetros para a bacia exemplo do SWMM, em termos de variação na vazão de pico e no volume total escoado, respectivamente.

Figura 18 – Análise de sensibilidade da bacia exemplo – vazão de pico.

Figura 19 – Análise de sensibilidade da bacia exemplo – volume total escoado.

A vazão de pico apresentou maior sensibilidade a variações nos parâmetros AI, NP, n e os parâmetros de infiltração do modelo de Horton. Para o volume total escoado, maiores variações ocorreram para as modificações dos parâmetros AI, NP e do modelo de Horton.

Assim, os parâmetros escolhidos para calibração desta bacia foram: AI, NI, NP, n e os parâmetros de infiltração do modelo de Horton (I0, Ib e k). O parâmetro NI foi escolhido devido à escolha de AI, procurando verificar se diferentes combinações destes parâmetros podem gerar resultados similares. As subáreas 6, 7 e 8 do sistema possuem valores de AI diferentes das demais subáreas, e a subárea 1 possui diferentes valores de I0 e Ib. Estes parâmetros foram considerados como novas variáveis do problema, totalizando 10 parâmetros de calibração: AI1, AI2, NI, NP, I01, I02, Ib1, Ib2, k e n. Assim, o vetor solução assumiu a configuração apresentada na Figura 20.

AI1	AI2	NI	NP	I01	I02	Ib1	Ib2	k	N
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀

Figura 20 – Vetor solução da bacia exemplo.

Para a bacia do córrego do Gregório, os resultados da análise de sensibilidade estão apresentados nas Figuras 21 e 22. Os valores iniciais adotados para os parâmetros foram aqueles encontrados por Collodel (2009), para esta bacia.

Figura 21 – Análise de sensibilidade da bacia do córrego do Gregório – vazão de pico.

Figura 22 – Análise de sensibilidade da bacia do córrego do Gregório – volume total escoado.

Para a bacia do córrego do Gregório, os parâmetros que mais apresentaram influência sobre a vazão de pico foram: AI, W, S, NI, NP, n e os parâmetros de infiltração de Horton. Para o volume total escoado, as maiores alterações ocorreram ao modificar os parâmetros AI, os parâmetros de infiltração, W, S e n.

Como descrito anteriormente, os parâmetros W, S e n são espacialmente variáveis, sendo calibrados multiplicadores de um valor inicial, obtido de Collodel (2009). Assim, os parâmetros escolhidos para calibração da bacia do córrego do Gregório foram: AI, mW, mS, NI, NP, mn e os três parâmetros de infiltração do modelo de Horton (I0, Ib e k).

A bacia do córrego do Gregório foi dividida de forma simplificada em áreas urbanas e rurais. Por isso, o parâmetro AI foi duplicado, sendo que AI1 corresponde à porção rural da bacia e AI2 corresponde à porção urbana.

Assim, para a bacia do córrego do Gregório, o vetor solução assumiu a configuração apresentada na Figura 23.

AI1	AI2	mW	mS	NI	NP	I0	Ib	k	mn
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀

Figura 23 – Vetor solução da bacia do córrego do Gregório.

5.2 Calibração da bacia exemplo do SWMM

Primeiramente, realizaram-se testes de eficiência do calibrador, através da calibração do sistema exemplo do pacote de instalação do SWMM, como descrito no item 4.5.1.

Nos experimentos do grupo A, ambas as funções objetivo adotadas (FO1 e FO2) alcançaram o valor mínimo nulo (0,00) próximo à iteração 20 (Figuras 24 e 25). Com este resultado, decidiu-se realizar os experimentos do grupo B, utilizando funções conflitantes (FO1 e FO3). Nestes experimentos, valores satisfatórios foram obtidos próximo à iteração 35 (Figuras 26 e 27).

Figura 24 – Evolução da FO1 ao longo das iterações – grupo A.

Figura 25 – Evolução da FO2 ao longo das iterações – grupo A.

Figura 26 – Evolução da FO1 ao longo das iterações – grupo B.

Figura 27 – Evolução da FO3 ao longo das iterações – grupo B.

O teste 5 (com limites de variação de -100 a +100% do valor inicial dos parâmetros) foi escolhido para a análise dos resultados aqui descritos. O comportamento em termos de função objetivo para este teste está ilustrado nas Figuras 28 a 31.

O calibrador proposto se mostrou eficiente na redução dos valores médios das funções objetivo, assim como do desvio padrão e dos valores extremos. Em alguns pontos do gráfico da Figura 30, nota-se um acréscimo no valor máximo da função objetivo, que se deve possivelmente à aplicação da mutação combinada com o elitismo controlado, que permite que uma solução de uma frente de dominância ruim passe para a próxima iteração. Este problema é corrigido em poucas iterações, pela própria evolução do algoritmo.

Figura 28 – Resultados da FO1 – teste 5, grupo A.

Figura 29 – Resultados da FO2 – teste 5, grupo A.

Figura 30 – Resultados da FO1 – teste 5, grupo B.

Figura 31 – Resultados da FO3 – teste 5, grupo B.

Devido às funções escolhidas, os testes do grupo A não geraram uma frente Pareto final, resultando em uma única solução no espaço de objetivos (0,00; 0,00). Para os testes do grupo B, uma solução da frente Pareto foi escolhida para representação do hidrograma resultante, como demonstrado pela Figura 32. A solução escolhida é aquela mais próxima da origem das funções FO1 e FO2.

Figura 32 – Frente Pareto formada no teste 5, grupo B.

Na Tabela 10, estão apresentados os valores dos parâmetros das soluções escolhidas dos grupos A e B, para o teste 5, comparando com os valores de referência.

Tabela 10 – Comparação dos valores dos parâmetros obtidos nos experimentos.

	Parâmetros									
	AI1 (%)	AI2 (%)	NI	NP	I01 (in/h)	I02 (in/h)	Ib1 (in/h)	Ib2 (in/h)	K (h ⁻¹)	n
Grupo A	50,2	9,6	0,001	0,10	0,34	0,67	0,24	0,3	3,73	0,01
Grupo B	51,6	8,2	0,001	0,10	0,48	0,8	0,28	0,3	5,87	0,01
Valores de referência	50	10	0,001	0,10	0,35	0,7	0,25	0,3	4,14	0,01

Beven & Freer (2001) introduziram o conceito de equifinalidade, que afirma que dois modelos diferentes podem produzir representações do comportamento dos processos naturais igualmente aceitáveis. No teste 5, este conceito se mostra evidente, uma vez que ambas as soluções apresentadas na Tabela 10, apesar de apresentarem algumas diferenças, mostraram-se satisfatórias para a representação do hidrograma de resposta da ocorrência do evento chuvoso sobre o sistema.

Nas Figuras 33 e 34 é apresentada a variação dos valores dos parâmetros na frente Pareto final para o teste 5 dos grupos A e B, respectivamente.

Figura 33 – Variação dos valores dos parâmetros sobre o valor real – grupo A.

Figura 34 – Variação dos valores dos parâmetros sobre o valor real – grupo B.

A maior variação dos parâmetros do grupo B se deve à diversidade das soluções presentes na frente Pareto, enquanto os experimentos do grupo A resultaram em apenas um ponto no espaço de objetivos. Ainda assim, houve uma pequena variação nos parâmetros do grupo A, cujas diferentes combinações resultaram no mesmo valor de funções objetivo.

Dentre os parâmetros que apresentaram maiores variações estão: NI, cuja análise de sensibilidade demonstrou baixa influência sobre a resposta do modelo (no caso desta bacia); IO e k, que determinam a taxa de infiltração ao longo das simulações. Diferentes combinações destes parâmetros podem resultar em modelos igualmente representativos. Reduzida variação foi observada para AI, NP, Ib e n, conforme esperado. AI2 apresentou variação maior que AI1 devido à sua distribuição no sistema. AI1 é aplicada a 5 subáreas, totalizando 45 acres de área, enquanto AI2 é aplicada a 3 subáreas, totalizando 26 acres. Da mesma forma, Ib1 é apenas aplicado à subárea 1, e portanto sua variação é maior que Ib2.

Os resultados da calibração mostraram-se satisfatórios para todos os testes realizados, conforme sugerem as informações contidas nas Figuras 35 a 38, onde são apresentados os hidrogramas resultantes para os condutos 10 e 8 analisados no teste 5 dos grupos A e B.

Figura 35 – Hidrogramas resultantes do conduto 10, grupo A.

Figura 36 – Hidrogramas resultantes do conduto 8, grupo A.

Figura 37 – Hidrogramas resultantes do conduto 10, grupo B.

Figura 38 – Hidrogramas resultantes do conduto 8, grupo B.

Para melhor visualização dos resultados do hidrograma, foram calculados coeficientes de eficiência de Nash & Sutcliffe (COE), segundo a Equação 9, apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados do coeficiente de eficiência para a bacia exemplo.

Grupo	Conduto	COE
A	10	1,00
	8	0,99
B	10	0,99
	8	0,99
média		0,99

Os resultados obtidos sugerem que o calibrador proposto pode ser considerado uma ferramenta bastante eficiente para a previsão do comportamento de sistemas de drenagem, uma vez que o modelo calibrado gerou saídas com acurácia satisfatória.

O tempo computacional médio requerido para a realização destes testes (com 200 soluções iniciais e 200 iterações) foi de uma hora, utilizando um computador Intel® Core i5 3,5GHz com 4,00GB de memória RAM.

5.3 Conjunto de funções objetivo

A presente análise foi realizada com onze funções objetivo. A calibração foi realizada através da minimização de duas funções por teste, sendo escolhida uma solução na frente Pareto final para cálculo das demais funções. A escolha da solução foi realizada conforme descrito no item 5.2.

Na Tabela 12, são apresentados estes resultados normalizados pelo maior valor de cada função objetivo, e a distância Euclidiana resultante.

Tabela 12 – Resultados das diferentes combinações de funções objetivo.

combinação	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	Distância Euclidiana da origem dos eixos
F1 - F2	0,00	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,12
F1 - F3	0,00	0,21	0,00	0,43	0,03	0,02	0,21	0,00	0,43	0,03	0,02	0,68
F1 - F4	0,38	0,54	0,38	0,05	0,41	0,64	0,54	0,38	0,05	0,41	0,64	1,47
F1 - F5	0,00	0,07	0,00	0,28	0,03	0,02	0,07	0,00	0,28	0,03	0,02	0,41
F1 - F6	0,00	0,52	0,00	1,00	0,03	0,01	0,52	0,00	1,00	0,03	0,01	1,60
F1 - F7	0,00	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,12
F1 - F8	0,00	0,18	0,00	0,39	0,03	0,02	0,18	0,00	0,39	0,03	0,02	0,60
F1 - F9	0,29	0,20	0,29	0,05	0,28	0,46	0,20	0,29	0,05	0,28	0,46	0,96
F1 - F10	0,00	0,08	0,00	0,26	0,03	0,03	0,08	0,00	0,26	0,03	0,03	0,39
F1 - F11	0,07	0,53	0,07	0,99	0,28	0,01	0,53	0,07	0,99	0,28	0,01	1,64
F2 - F3	0,00	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,12
F2 - F4	0,34	0,32	0,34	0,05	0,38	0,57	0,32	0,34	0,05	0,38	0,57	1,23
F2 - F5	0,00	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,12
F2 - F6	0,00	0,00	0,00	0,07	0,03	0,01	0,00	0,00	0,07	0,03	0,01	0,11
F2 - F7	0,00	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,12
F2 - F8	0,00	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,12
F2 - F9	0,40	0,11	0,40	0,05	0,42	0,70	0,11	0,40	0,05	0,42	0,70	1,35
F2 - F10	0,00	0,00	0,00	0,07	0,03	0,03	0,00	0,00	0,07	0,03	0,03	0,12
F2 - F11	0,06	0,52	0,06	1,00	0,28	0,01	0,52	0,06	1,00	0,28	0,01	1,65
F3 - F4	0,39	0,30	0,39	0,05	0,49	0,52	0,30	0,39	0,05	0,49	0,52	1,29
F3 - F5	0,00	0,13	0,00	0,35	0,03	0,02	0,13	0,00	0,35	0,03	0,02	0,53
F3 - F6	0,00	0,41	0,00	0,80	0,03	0,01	0,41	0,00	0,80	0,03	0,01	1,28
F3 - F7	0,00	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,12
F3 - F8	0,00	0,16	0,00	0,35	0,03	0,02	0,16	0,00	0,35	0,03	0,02	0,55
F3 - F9	0,43	0,31	0,43	0,05	0,46	0,64	0,31	0,43	0,05	0,46	0,64	1,40
F3 - F10	0,00	0,24	0,00	0,55	0,03	0,02	0,24	0,00	0,55	0,03	0,02	0,85
F3 - F11	0,06	0,53	0,06	0,99	0,28	0,01	0,53	0,06	0,99	0,28	0,01	1,64
F4 - F5	0,18	0,22	0,18	0,05	0,10	0,46	0,22	0,18	0,05	0,10	0,46	0,80
F4 - F6	0,37	0,43	0,37	0,05	0,37	0,57	0,43	0,37	0,05	0,37	0,57	1,30
F4 - F7	0,12	0,01	0,12	0,06	0,19	0,33	0,01	0,12	0,06	0,19	0,33	0,58
F4 - F8	0,07	0,42	0,07	0,05	0,05	0,18	0,42	0,07	0,05	0,05	0,18	0,67
F4 - F9	1,00	0,67	1,00	0,04	1,00	1,00	0,67	1,00	0,04	1,00	1,00	2,81

F4 - F10	0,14	0,28	0,14	0,05	0,06	0,35	0,28	0,14	0,05	0,06	0,35	0,68
F4 - F11	0,07	0,28	0,07	0,06	0,08	0,01	0,28	0,07	0,06	0,08	0,01	0,43
F5 - F6	0,02	0,51	0,02	0,96	0,03	0,01	0,51	0,02	0,96	0,03	0,01	1,54
F5 - F7	0,00	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,12
F5 - 8F	0,00	0,02	0,00	0,11	0,03	0,02	0,02	0,00	0,11	0,03	0,02	0,16
F5 - F9	0,38	0,45	0,38	0,04	0,37	0,64	0,45	0,38	0,04	0,37	0,64	1,40
F5 - F10	0,04	1,00	0,04	0,75	0,03	0,13	1,00	0,04	0,75	0,03	0,13	1,78
F5 - F11	0,07	0,53	0,07	0,99	0,28	0,01	0,53	0,07	0,99	0,28	0,01	1,64
F6 - F7	0,00	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,12
F6 - F8	0,00	0,21	0,00	0,44	0,03	0,02	0,21	0,00	0,44	0,03	0,02	0,69
F6 - F9	0,15	0,62	0,15	0,05	0,06	0,28	0,62	0,15	0,05	0,06	0,28	1,00
F6 - F10	0,02	0,46	0,02	0,85	0,03	0,01	0,46	0,02	0,85	0,03	0,01	1,37
F6 - F11	0,07	0,53	0,07	0,99	0,28	0,01	0,53	0,07	0,99	0,28	0,01	1,64
F7 - F8	0,00	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,12
F7 - F9	0,13	0,16	0,13	0,05	0,12	0,32	0,16	0,13	0,05	0,12	0,32	0,58
F7 - F10	0,00	0,02	0,00	0,17	0,03	0,02	0,02	0,00	0,17	0,03	0,02	0,24
F7 - F11	0,00	0,00	0,00	0,07	0,03	0,01	0,00	0,00	0,07	0,03	0,01	0,11
F8 - F9	0,37	0,45	0,37	0,05	0,44	0,57	0,45	0,37	0,05	0,44	0,57	1,36
F8 - F10	0,00	0,05	0,00	0,17	0,03	0,02	0,05	0,00	0,17	0,03	0,02	0,25
F8 - F11	0,00	0,52	0,00	1,00	0,03	0,01	0,52	0,00	1,00	0,03	0,01	1,60
F9 - F10	0,54	0,55	0,54	0,04	0,54	0,70	0,55	0,54	0,04	0,54	0,70	1,75
F9 - F11	0,14	0,47	0,14	0,05	0,13	0,01	0,47	0,14	0,05	0,13	0,01	0,74
F10 - F11	0,03	0,53	0,03	0,99	0,03	0,01	0,53	0,03	0,99	0,03	0,01	1,59

Observa-se que as combinações F2 - F6 e F7 - F11 produziram os melhores resultados, ou seja, a mínima distância Euclidiana (Figura 39). A Figura 40 apresenta mais detalhadamente as combinações que resultaram em distâncias Euclidianas menores que 0,15, em ordem crescente, para facilitar a visualização das pequenas diferenças.

Os piores resultados ocorreram com a combinação F4 - F9, cujas funções são bastante parecidas, sendo diferenciadas apenas por um denominador. Elas priorizam a minimização das vazões mais baixas do hidrograma, fato que justifica seu mau desempenho.

Figura 39 – Distância Euclidiana resultante das diferentes combinações de FOs.

Figura 40 – Detalhe da comparação da distância Euclidiana.

Analisando separadamente os resultados de cada função, as combinações F2 - F6 e F7 - F11 produziram os melhores resultados para todas as funções (Figura 41), exceto as funções F4 e F9. Porém, verificou-se que a combinação F4 - F9 não apresentou bom desempenho, conforme discutido anteriormente. As funções F5 e F10 apresentaram resultados relativamente piores que as demais funções. Estas últimas são funções similares, sendo que a F5 é igual à F10 adimensionalizada. Calculam a aproximação do pico do hidrograma, ou seja, são apenas medidas pontuais, desconsiderando a avaliação geral do hidrograma.

Figura 41 – Resultados da combinação F2 e F6.

Assim, as combinações mais promissoras são as duplas F2 - F6 e F7 - F11. A função F2 é similar à F7, sendo diferenciada apenas por um denominador correspondente ao número de intervalos de tempo observados. A função F6 é também similar à F11, sendo diferenciada pela divisão pelo valor observado do volume total escoado, que torna a função adimensional. Optou-se por escolher a primeira combinação devido ao fato de pretender-se utilizar o calibrador para avaliar diferentes abordagens multievento. Ao considerarem-se os desvios absolutos, corre-se o risco da otimização atribuir maior peso aos grandes desvios absolutos que a desvios percentualmente maiores.

5.4 Calibração da bacia do córrego do Gregório

Para a calibração da bacia do córrego Gregório, foram escolhidos três eventos (3, 27 e 49), calibrados separadamente, utilizando o método de infiltração de Horton. Para reduzir o

número e o tempo das simulações, adotou-se o modelo de propagação do escoamento da onda cinemática, uma vez que este produz resultados satisfatórios demandando menor tempo computacional, quando comparado à onda dinâmica.

A evolução dos valores mínimos das funções objetivo ao longo das iterações está apresentada nas Figuras 42 e 43, para todos os eventos calibrados.

Figura 42 – Evolução do valor da F2 – bacia do córrego do Gregório.

Figura 43 – Evolução do valor da F6 – bacia do córrego do Gregório.

Observa-se que as mais evidentes reduções nos valores das funções objetivo ocorrem sempre nas primeiras iterações, quando a população encontra-se ainda bastante diversificada. A F6 alcança um valor bastante próximo de zero para os eventos 3 e 49 logo na terceira iteração, sendo que a melhora ocorre somente em termos dos valores de F2 a partir desta iteração.

A Figura 44 mostra um exemplo da evolução das frentes Pareto no decorrer da simulação, para o evento 3. Observa-se que a proximidade com a origem dos eixos dos objetivos aumenta a cada iteração. A pequena população de soluções nas iterações iniciais é explicada pelo elitismo controlado, uma vez que este limita o número de soluções em cada frente baseado no número total de frentes da iteração. Como o número de frentes de dominância é mais elevado, poucas soluções são admitidas na frente Pareto nas primeiras iterações, crescendo à medida que o número de frentes de dominância se reduz (Figura 45).

Figura 44 – Evolução das frentes Pareto – evento 3.

Figura 45 – Evolução do número de soluções na frente Pareto – evento 3.

A frente Pareto final apresentada é bastante consistente, com as soluções próximas ao ponto ótimo (0,00; 0,00) e ainda bem distribuídas ao longo da frente. A frente formada na

iteração 100 já é similar à resultante na última iteração, sugerindo a necessidade de alteração no operador de mutação do algoritmo. A mutação é responsável pela alteração das soluções, especialmente nas iterações avançadas, uma vez que a recombinação já não surte efeitos significativos quando a população apresenta baixa diversidade.

O elitismo controlado limita o número de soluções nas frentes de dominância, assegurando a diversidade das soluções. Na Figura 46, esta característica se mostra bastante pronunciada, sendo que cada frente Pareto assume um número de soluções padrão médio a partir da iteração 100.

Figura 46 – Evolução do número de soluções por frente de dominância – evento 3.

De modo geral, o calibrador proposto mostrou-se eficiente em reduzir a média dos valores das funções objetivo, assim como dos valores extremos (Figuras 47 a 52) ao longo das iterações. Para o evento 27, os valores máximos se mostraram bastante variáveis, ocasionando também alterações nos valores médios apresentados. Este fato pode ser justificado pela aplicação do elitismo controlado no algoritmo, que permite que soluções menos aptas sejam reproduzidas na próxima iteração, visando a diversidade das soluções.

Figura 47 – Resultados de F2 – evento 3.

Figura 48 – Resultados de F6 – evento 3.

Figura 49 – Resultados de F2 – evento 27.

Figura 50 – Resultados de F6 – evento 27.

Figura 51 – Resultados de F2 – evento 49.

Figura 52 – Resultados de F6 – evento 49.

As frentes Pareto resultantes dos eventos calibrados estão apresentadas na Figura 53.

Figura 53 – Frentes Pareto resultantes das calibrações dos eventos.

Observa-se que o evento 27 apresentou uma frente Pareto final mais distanciada da origem dos eixos dos objetivos, fato verificado também nas Figuras 42 e 43. Isto pode indicar necessidade de maior número de iterações na calibração deste evento para alcançar resultados mais satisfatórios.

Para cada evento, a solução da frente Pareto escolhida para representação do hidrograma resultante é aquela que apresentou menor distância à origem, conforme a Equação 39.

$$distância = \sqrt{(F2^2 + F6^2)} \quad \text{Equação 39}$$

Na Tabela 13, são apresentados os valores médios obtidos para os parâmetros das soluções escolhidas.

Tabela 13 – Valores dos parâmetros calibrados por evento.

Parâmetros	AI1 (%)	AI2 (%)	mW	mS	NI	NP	I0 (mm/h)	Ib (mm/h)	K (h ⁻¹)	mn
Evento 3	0,03	70,00	0,80	0,80	0,03	0,20	44,07	2,50	3,32	1,20
Evento 27	5,92	40,06	0,81	0,85	0,03	0,10	8,26	3,06	6,75	0,80
Evento 49	10,00	70,00	0,80	0,80	0,03	0,20	44,14	2,73	2,00	0,80
média	5,32	60,02	0,80	0,82	0,03	0,17	32,16	2,76	4,02	0,93

Observa-se que o evento 27 apresentou maiores variações se comparado aos demais, apontando novamente à possível necessidade de maior número de iterações na calibração deste evento.

Os valores dos parâmetros NI, mW e mS obtidos para os eventos isoladamente apresentaram pequenas variações, uma vez que estes demonstraram elevada influência sobre os resultados da simulação, conforme a análise de sensibilidade. Já os parâmetros AI, mn e de infiltração, apresentaram maiores variações. Isto se deve provavelmente à compensação entre os parâmetros, retomando o conceito de equifinalidade de Beven & Freer (2001). Por exemplo, ao se reduzir a porcentagem de áreas impermeáveis, e ao mesmo tempo reduzir as taxas de infiltração, o volume total escoado pode resultar similar ao original (sem ambas as alterações). Como a calibração foi realizada para um grande número de parâmetros, um número ainda maior de combinações de valores é possível.

O princípio da parcimônia é uma noção de modelagem que visa à representação da estrutura do modelo com o menor número de parâmetros possível. Esta abordagem considera a parametrização mais simples melhor do que as complexas, quando assegurado um bom ajuste. Especificamente na modelagem hidrológica, muitas aplicações práticas deste conceito já foram estudadas (Beven, 1989; Jakeman & Hornberger, 1993; Perrin et al., 2001). Neste sentido, uma sugestão para trabalhos futuros é a redução do número de parâmetros a serem calibrados, através da determinação em campo.

Os valores dos parâmetros calibrados apresentaram-se condizentes aos esperados, de acordo com a literatura existente (Tabela 14). As diferenças podem ter sido ocasionadas pelos eventos escolhidos para calibração. O valor de AI apresentado por Collodel (2009) é uma média geral, considerando as áreas urbanas e rurais.

Tabela 14 – Comparação dos valores dos parâmetros calibrados com os encontrados na literatura.

Parâmetros	Valor médio calibrado	Valores esperados (Collodel, 2009)	Valores esperados (Barbassa, 2005)	Valores típicos (James, 2008)
AI1 (%)	5,32	39,11	-	-
AI2 (%)	60,02		-	-
mW	0,80	1,00	-	-
mS	0,82	1,00	-	-
NI	0,03	0,02	-	0,01 – 0,04
NP	0,17	0,124	-	0,1 – 0,8
I0 (mm/h)	32,16	22,07	28,8	8 – 254
Ib (mm/h)	2,76	11,00	9,4	2,5 – 120
K (h ⁻¹)	4,02	3,74	3,6	2 – 7
mn	0,93	1,00	-	-

Nas Figuras 54, 55 e 56, são apresentados os hidrogramas observados e simulados para os eventos 3, 27 e 49. Pode-se dizer que, de uma forma geral, há uma boa aderência dos resultados do modelo ao hidrograma observado, exceção feita aos picos do evento 27, que como discutido, possivelmente necessitaria de maior número de iterações.

Figura 54 – Hidrogramas observado e simulado – evento 3.

Figura 55 – hidrogramas observado e simulado – evento 27.

Figura 56 – Hidrogramas observado e simulado – evento 49.

Os resultados da calibração mostraram-se satisfatórios para todos os testes, conforme os coeficientes de eficiência de Nash & Sutcliffe (COE) encontrados em cada evento apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Coeficientes de eficiência para a bacia do córrego do Gregório.

Evento	COE
3	0,83
27	0,79
49	0,98
média	0,87

Collodel (2009) obteve os coeficientes de eficiência de Nash & Sutcliffe médios de 0,83 na calibração dos parâmetros não variáveis espacialmente e 0,75 para os demais parâmetros, ao realizar a calibração para a mesma bacia, porém para eventos diferentes.

O tempo computacional requerido para a realização destes testes (com 200 soluções iniciais e 200 iterações) variou de 2 a 4 horas, dependendo do evento analisado, utilizando um Intel® Core i5 3,5GHz com 4,00GB de memória RAM.

5.5 Abordagem multievento

Como descrito anteriormente, na abordagem proposta por Dayaratne, os valores dos parâmetros resultantes da calibração de cada evento foram utilizados para simular novamente todos os eventos, cujos resultados estão apresentados na Figura 57.

Figura 57 – Resultados da abordagem de Dayaratne.

As simulações utilizando os parâmetros resultantes da calibração do evento 27 só apresentaram bons resultados para o próprio evento 27, enquanto nos demais, os valores obtidos das FOs mostraram-se significativamente maiores do que as demais simulações (utilizando outros valores de parâmetros).

Como era esperado, a melhor simulação para o evento 3 foi aquela realizada utilizando os parâmetros da calibração do próprio evento 3. Analogamente, para o evento 49, a melhor simulação foi encontrada a partir da utilização dos parâmetros resultantes da calibração do evento 49. A comparação entre as simulações utilizando os parâmetros resultantes da calibração dos eventos 3 e 49 foi realizada através da simulação do evento 27. Considerando a F2, a diferença é insignificante, enquanto considerando a F6, a simulação utilizando os parâmetros resultantes da calibração do evento 3 fornece melhores resultados. Assim, os valores dos parâmetros resultantes da calibração do evento 3 foram escolhidos como representantes da abordagem de Dayaratne.

As simulações da abordagem multievento baseada na média das FOs foram realizadas conforme descrição do item 0. Nesta abordagem, o resultado é composto dos valores de F2 e F6 médios dos eventos. Entretanto, para possibilitar a comparação com as demais abordagens, apresentam-se como resultados os fatores que compõem essa média das FOs, separadamente, por evento.

A comparação entre as abordagens tradicional, de Dayaratne, da média das FOs e de Pierro é apresentada na Figura 58.

Figura 58 – Comparação por evento entre as abordagens tradicional, de Dayaratne, média das FOs e de Pierro.

Para a simulação do evento 3, a melhor abordagem foi a de Dayaratne, conforme esperado, uma vez que os parâmetros resultantes da calibração deste evento foram escolhidos na análise prévia da abordagem de Dayaratne. Para o evento 27, os melhores resultados da simulação foram obtidos pela utilização dos parâmetros da calibração tradicional. Já para a simulação do evento 49, a melhor abordagem adotada foi a média das FOs. A comparação entre as diferentes abordagens fica dificultada ao se considerar os eventos separadamente, uma vez que a simulação de cada evento é favorecida por uma abordagem diferente. Para facilitar o entendimento dos resultados, os valores das FOs de cada evento foram padronizados em relação ao maior valor obtido, de modo a expressar proporcionalmente as diferenças entre as abordagens. Calculou-se então uma média das FOs dos eventos, padronizadas pelo maior valor (Figura 59).

Figura 59 - Comparação geral entre as abordagens tradicional, de Dayaratne, média das FOs e de Pierro.

Assim, fica claro que a abordagem através da média das FOs é mais adequada para a calibração multievento. Além disso, ela é mais facilmente aplicada do que as abordagens tradicional e de Dayaratne, já que estas últimas necessitam de calibrações isoladas dos eventos. Comparando-se com a abordagem de Pierro, a média das FOs apresentou tempo computacional de simulação 10 vezes menor. Isto se deve às comparações necessárias para compor as frentes de dominância da abordagem de Pierro, que é dificultada pelo aumento de dimensões da frente no espaço de objetivos.

De um modo geral, as abordagens de calibração simultânea de eventos (média das FOs e de Pierro) apresentaram melhores resultados. A abordagem de Dayaratne também apresentou bons resultados, porém sua eficiência depende sobremaneira do evento representativo escolhido.

Como sugestão para trabalhos futuros, com disponibilidade de registro contínuo de observações, fica a possibilidade de analisar o monitoramento contínuo, ao invés de segmentar os dados existentes em eventos.

5.6 Validação

Para a validação, foram utilizados os resultados da calibração multievento através da média das FOs (Tabela 16).

Tabela 16 – Valores dos parâmetros calibrados com a configuração mais adequada.

Parâmetros	AI1 (%)	AI2 (%)	mW	mS	NI	NP	I0 (mm/h)	Ib (mm/h)	K (h ⁻¹)	mn
Valores calibrados	9,94	69,99	0,80	0,80	0,03	0,20	44,06	2,50	3,01	0,80

Os resultados da validação são ilustrados nas Figuras 60 a 69, cuja inspeção visual permite a conclusão de que todos os eventos são satisfatoriamente reproduzidos pelo modelo calibrado.

Figura 60 – Hidrogramas observado e simulado – evento 4.

Figura 61 – Hidrogramas observado e simulado – evento 7.

Figura 62 – Hidrogramas observado e simulado – evento 12.

Figura 63 – Hidrogramas observado e simulado – evento 15.

Figura 64 – Hidrogramas observado e simulado – evento 17.

Figura 65 – Hidrogramas observado e simulado – evento 30.

Figura 66 – Hidrogramas observado e simulado – evento 40.

Figura 67 – Hidrogramas observado e simulado – evento 46.

Figura 68 – Hidrogramas observado e simulado – evento 48.

Figura 69 – Hidrogramas observado e simulado – evento 55.

Também foram calculados os coeficientes de eficiência de Nash & Sutcliffe para os testes de validação, cujos resultados estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Coeficientes de eficiência para a bacia do córrego do Gregório.

Evento	COE
4	0,79
7	0,84
12	0,60
15	0,89
17	0,85
30	0,96
40	0,97
46	0,82
48	0,81
55	0,87
média	0,84

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um calibrador automático multiobjetivo para o SWMM. O método de otimização adotado foi o NSGA II com elitismo controlado. O calibrador foi desenvolvido de forma genérica, apresentando fácil interface com o usuário. As especificações da calibração são estabelecidas em um arquivo texto, e as informações referentes ao sistema a ser calibrado são obtidas através do arquivo de entrada do SWMM. Os resultados são também fornecidos em arquivos texto.

Dois sistemas diferentes foram calibrados: uma bacia exemplo fictícia, fornecida conjuntamente ao pacote de instalação do SWMM, e a bacia do córrego do Gregório, localizada no município de São Carlos, SP.

Previamente à calibração, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros de ambos os sistemas, para determinar os parâmetros a serem calibrados. Para a bacia exemplo do SWMM, os parâmetros escolhidos para calibração foram: AI, NI, NP, n e os parâmetros do modelo de infiltração de Horton. Para a bacia do córrego do Gregório, além dos parâmetros acima citados, escolheram-se os parâmetros: W e S.

O calibrador foi primeiramente aplicado à bacia exemplo do SWMM, em dois grupos de testes variando as funções objetivo e os valores limite das variáveis de decisão. Resultados satisfatórios foram obtidos antes da iteração 35, para ambos os grupos, mesmo para a mais ampla faixa de valores limite (-100 a +100% do valor inicial dos parâmetros). Os resultados obtidos produziram coeficiente de eficiência de Nash & Sutcliffe médio de 0,99.

Comprovada a eficiência do calibrador com a bacia exemplo, foram realizados testes variando a combinação de funções objetivo, ainda aplicada à bacia exemplo. Onze funções foram testadas, duas a duas, resultando em 55 combinações diferentes. A combinação da F2 e F6 apresentaram resultados mais satisfatórios, sendo adotada nos testes seguintes do calibrador.

A calibração da bacia do Gregório foi realizada baseando-se em 3 eventos temporalmente espaçados e de características diversificadas, visando a representabilidade dos valores calibrados para todo o período de dados disponíveis. A calibração alcançou resultados satisfatórios para todos os eventos, com coeficiente de eficiência de Nash & Sutcliffe médio de 0,87.

Suplementarmente, testes utilizando diferentes abordagens multievento foram realizados, possibilitando a conclusão de que é válida a calibração através da média dos

valores das FOs para todos os eventos, de forma a fornecer resultados mais representativos do sistema.

Por fim, a validação comprovou a eficiência do calibrador, aplicada a 10 eventos diferentes ocorridos na bacia do córrego do Gregório, com coeficiente de eficiência de Nash & Sutcliffe médio de 0,84.

Como sugestões para os próximos trabalhos, podem ser citadas:

- Comparações entre outros métodos multiobjetivo mais recentes;
- Aplicações dos métodos de análise de incertezas na calibração de modelos hidrológicos;
- Aplicação da metodologia de avaliação de múltiplos pontos de monitoramento de vazão;
- Consideração da microdrenagem na simulação;
- Utilização de Sistema de Informações Geográficas (SIG) para otimizar e melhorar as caracterizações dos parâmetros físicos da bacia hidrográfica;
- Aplicação a diferentes bacias de estudo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baffaut, C.; Delleur, J. W. (1989). **Expert System for Calibrating SWMM**. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 115, No. 3. ASCE.
- Barbassa, A. P. (1991). **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.
- Barbassa, A. P.; Pugliese, P. B.; Moreira, J. (2005). **Estudo de Enchentes Urbanas Associando Rede de Monitoramento Densa, SIG, e Modelo Distribuído**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa, PB.
- Barco, J.; Wong, K. M.; Stenstrom, M. K. (2008). **Automatic calibration of the US EPA SWMM model for a large urban catchment**. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 134, No. 4.
- Bastos, G. A. P. (2007). **Análise dos parâmetros do SWMM para avaliação do escoamento em duas bacias periurbanas em Santa Maria-RS**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS).
- Beven, K. J. (1989). **Changing ideas in hydrology – the case of physically-based models**. J. Hydrol. 257, 189-211.
- Beven, K.J.; Freer, J. (2001). **Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems**. Journal of Hydrology, 249, 11–29.
- Boyle, D. P.; Gupta, H. V.; Sorooshian, S. (2000). **Toward improved calibration of hydrologic models: combining the strengths of manual and automatic methods**. Water Resour. Res. 36(12), 3663–3674.
- 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.
- Centro de Divulgação Científica e Cultural (CDCC). **Arquivos**. Universidade de São Paulo. 2010.

Cho, J. H.; Seo, H. J. (2007). **Parameter optimization of SWMM for runoff quantity and quality calculation in a eutrophic lake watershed using a genetic algorithm.** Water Science & Technology: Water Supply Vol 7 No 5-6 pp 35–41.

Coello, C. A.; Veldhuizen, D. A.; Lamont, G. B. (2002). **Evolutionary Algorithms for solving Multi-Objective Problems.** Kluwer Acad, Norwell, Mass.

Collischonn, W.; Tucci, C. E. M. (2003). **Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico.** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol.8 n3, 27-39.

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.

Dayaratne, S. T.; Perera, B. J. C. (2004). **Calibration of urban stormwater drainage models using hydrograph modeling.** Urban Water Journal, 1:4,283-297. doi: 10.1080/15730620412331299057.

Deb, K.; Agrawal, S.; Pratap, A.; Meyarivan, T. (2000). **A fast elitist nondominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II.** In M. S. et al. (Ed.), Parallel Problem Solving from Nature – PPSN VI, Berlin, pp. 849–858. Springer.

Deb, K. (2001). **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms,** John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.

Deb, K.; Goel, T. (2001). **Controlled elitist non-dominated sorting genetic algorithms for better convergence.** In Proceedings of the first International Conference on Evolutionary Multi-criterion Optimization (EMO-2001), pp.67-81.

Deb, K.; Agrawal, R. B. (1995). **Simulated Binary crossover for continuous search space.** Complex systems 9(2), 115-148.

Deb, K.; Goyal, M. (1996). **A combined genetic adaptive search (GeneAS) for engineering design.** Computer Science and Informatics 26(4), 30-45.

Duan, Q.; Sorooshian, S.; Gupta, V. K. (1992). **Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models.** Water Resources Res., 28 (4), 1015 – 1031.

Efstradiadis, A.; Koutsoyiannis, D. (2010). **One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modeling: a review.** Hydrol. Sci. Journal, 55: 1, 58-78.

- Elliot, A. H.; Trowsdale, S. A. (2007). **A Review of Models for Low Impact Urban Stormwater**. *Environmental Modelling & Software*, 22, 394–405. 2007.
- Garcia, J. I. B. (2005). **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.
- Green, I. R. A.; Stephenson, D. (1986). **Criteria for comparison of single event models**. *Hydrological Sciences Journal*, 31:3,395-411. doi: 10.1080/02626668609491056.
- Gupta, H. V.; Sorooshian, S.; Yapo, P. O. (1998). **Toward improved calibration of hydrologic models: multiple and non-commensurable measures of information**. *Water Resour. Res.* 34(4), 751–763.
- Holland, J.H.. (1975). **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Huber, W. C.; Dickinson, R.E. (1992). **Storm Water Management Model, version 4: user's manual**. U.S. Environmental Protection Agency. Athens, Georgia.
- Jakeman, A. J.; Hornberger, G. M. (1993). **How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model?** *Water Resour. Res.* 29, 2637-2649.
- James, W. R. C.; Wan, B.; James, W. (2002). **Implementation in PCSWMM using Genetic Algorithms for auto calibration and design-optimization**. *Urban Drainage* 2002.
- James, W.; Huber, W. C.; Dickinson, R. E.; Pitt, R. E.; James, W. R. C.; Rosener, L. A.; Aldrich, J. A.. (2008). **User's Guide to SWMM 5**, publicado por CHI, Guelph, Ontario, Canadá.
- Lima, G.; Boldrin, R. S.; Mendiando, E. M.; Mauad, F. F. (2007). **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.
- Liong, S. Y.; Chan, W. T., Lum, L. H. (1991). **Knowledge-based system for SWMM runoff component calibration**. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 117, n5.
- Liong, S. Y. et. al. (1993). **Computer-aided catchment calibration model**. *Advances in Engineering Software*. v. 17, 147-154 pp.
- Liong, S. Y., Chan, W. T.; Shree Ram, J. (1995). **Peak-flow Forecasting with Genetic Algorithm and SWMM**. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, 121(8), 613-617.

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

286 p.

Maksimovic, C. (2001). **General overview of urban drainage principles and practice**. In: Urban drainage in Specific climates. Volume 1: urban drainage in humid tropics. 227p. Unesco: Paris.

Meller, A.; Paiva, E. M. C. D. (2007). **Simulação hidrodinâmica 1D de inundações em sistema de drenagem urbana**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, p. 1-11.

Mendes, H. C.; Menciondo, E. M. (2007). **Histórico da Expansão Urbana e Incidência de Inundações: O Caso da Bacia do Gregório, São Carlos – SP**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol 12 n1. Jan/Mar 2007, 17-27.

Moreira, I. A. (2005). **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba (PR).

Nações unidas (2007). **World urbanization prospects: the 2007 Revision. United Nations Department of Economic and Social Affairs. Population Division**. Disponível em <http://www.un.org/esa/population/publications/wup2007/2007WUP_Highlights_web.pdf>. New York. Acessado em 15/01/10.

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

Ohnuma Jr, A. A. (2005). **Cenários de Reuso de Água Pluvial e Controle de Drenagem visando a Recuperação Ambiental da Micro-Bacia do Alto Tijuco Preto, São Carlos/SP**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Perrin, C.; Michel, C.; Andréassian, V. (2001). **Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment structures on 429 catchments**. J. Hydrol. 242 (3-4), 275-301.

Pierro, F.; Khu, S. T.; Savic, D. (2006). **From single-objective to multiple-objective multiple-rainfall events automatic calibration of urban storm water runoff models using genetic algorithms**. Water Science & Technology. Vol.54 n6-7 pp 57-64.

- Porto, R. L. (2004). **Drenagem Urbana**. In: Hidrologia: Ciência e Aplicação. 3ª Ed. UFRGS, Porto Alegre.
- Porto, R. Q. et. al. (2008). **Avaliação da escolha de diferentes funções-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico SMAP**. Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 29, n. 1, p. 27-36.
- Rennó, C. D.; Soares, J. V. (2010) **Conceitos básicos de modelagem hidrológica**. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2_modelos_hidrologicos.pdf> Acesso em: 15/01/10.
- Rossman, L. A. (2009). **Storm Water Management Model, Version 5.0: User's Manual**. U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- Silveira, A. L. L. (1998). **Hidrologia Urbana no Brasil**. In: Drenagem Urbana – Gerenciamento, Simulação e Controle / Org. BRAGA, B.; TUCCI, C. E. M.; TOZZI, M., Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH.
- Souza, T. F. (2008). **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.
- Srinivas, N.; Deb, K. (1994). **Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms**. Evolutionary Computation 2(3): 221-248.
- Tassi, R.; Bravo, J. M.; Meller, A.; Collischonn, W. (2006). **Avaliação do impacto de diferentes funções-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico IPH II**. XXII Congresso Latinoamericano de Hidráulica.
- Tucci, C. E. M. (1998) **Modelos Hidrológicos**, Editora da UFRGS/ABRH, 1ª ed. da coleção ABRH de Recursos Hídricos, Porto Alegre.
- Tucci, C. E. M. (2005). **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Saneamento para Todos. Programa de Modernização do Setor Saneamento - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Ministério das Cidades. Brasília.
- Vrugt, J. A.; Gupta, H. V.; Bastidas, L. A. Bouten, W.; Sorooshian, S. (2003). **Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models**. Water Resour. Res. 39(8), 1214, doi: 10.1029/2002WR001746.
- Vrugt, J. A., Robinson, B. A. **Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimethod search**. Proc Natl Acad Sci USA 2007; 104:708–11.

Wan, B.; James, W. (2002). **SWMM Calibration using Genetic Algorithms**. Urban Drainage.

Warwick, J. J.; Tadepalli, P. (1991). **Efficacy of SWMM Application**. ASCE – Journal of Water Resources Planning and Management, v. 117, n. 3, 352-366 pp.

Yapo, P. O.; Gupta, H. V.; Sorooshian, S. (1998). **Multi-objective global optimization for hydrologic models**. J. Hydrol. 204, 83–97.

Zoppou, C. (2001). **Review of urban storm water models**. Environmental Modelling & Software 16. 195-231.

APÊNDICE A – Arquivo de entrada dos parâmetros do NSGA II

Quadro 4 – Arquivo de entrada dos parâmetros do NSGA II.

```
;Arquivo Example1.inp

[PMUT]
0.07

[PCROSS]
0.7

[PARAMETROS]
10

[POP]
200

[ITERACOES]
200

[LIMITES PARAMETROS]
AI1      0      100
AI2      0      20
NI       0.000  0.002
NP       0.00   0.20
I01      0.00   0.70
I02      0.0    1.4
Ib1      0.00   0.50
Ib2      0.0    0.6
k        0.00   8.28
n        0.00   0.02

[CHUVAS]
RG1

[PTOS OBSERVADOS]
CP5

[VAZAO]
vazao_RG1.txt

[FOS]
2 6
```

APÊNDICE B – Dados da bacia do córrego do Gregório

[SUBCATCHMENTS]

ID	Outlet node	Area (ha)	W (m)	S (%)	SI (mm)	SP (mm)	Z
S1	JP1	20.3	719	1.58	1.47	3.13	25
S2	JP1	5	523	2.28	1.47	3.13	25
S3	JS1	9	402	2.02	1.47	3.13	25
S4	JS1	8.4	480	1.97	1.47	3.13	25
S5	JP2	4.8	640	1.89	1.47	3.13	25
S6	JP2	1.6	391	3.89	1.47	3.13	25
S7	JP2	2.1	420	2.32	1.47	3.13	25
S8	JP2	6.7	618	2.17	1.47	3.13	25
S9	JP3	49.7	1851	2.52	1.47	3.13	25
S10	JP3	46.8	2255	2.87	1.47	3.13	25
S11	JS2.1	0.1	199	2.36	1.47	3.13	25
S12	JS2.1	1.6	219	3.68	1.47	3.13	25
S13	JS2.2	19.4	885	3.45	1.47	3.13	25
S14	JS2.2	15.7	930	4.26	1.47	3.13	25
S15	JT1	1.8	523	4.58	1.47	3.13	25
S16	JT1	4.1	550	3.68	1.47	3.13	25
S17	JS2.2	14	755	3.4	1.47	3.13	25
S18	JS2.2	6.5	636	4.59	1.47	3.13	25
S19	JP3	22.6	1722	2.67	1.47	3.13	25
S20	JP3	44.5	1350	2.57	1.47	3.13	25
S21	JP4	172.2	2950	1.54	1.47	3.13	25
S22	JP4	115.4	2615	2.01	1.47	3.13	25
S23	JS3	0.1	144	1.09	1.47	3.13	25
S24	JS3	0.2	135	1.05	1.47	3.13	25
S25	JP4	66.3	2466	2.25	1.47	3.13	25
S26	JP4	56.1	2373	2.63	1.47	3.13	25
S27	JP5	33.6	1850	2.04	1.47	3.13	25
S28	JP5	17.7	1011	2.54	1.47	3.13	25
S29	JS4.1	0.3	171	2.8	1.47	3.13	25
S30	JS4.1	0.2	173	1.84	1.47	3.13	25
S31	JS4.2	3.9	586	2.36	1.47	3.13	25
S32	JS4.2	5.3	622	2.36	1.47	3.13	25
S33	JT2	1	302	3.02	1.47	3.13	25
S34	JT2	0.7	322	1.58	1.47	3.13	25
S35	JS4.2	1.5	598	3.68	1.47	3.13	25
S36	JS4.2	2.5	579	3.47	1.47	3.13	25
S37	JS4.3	0.7	412	1.43	1.47	3.13	25
S38	JS4.3	0.5	262	0.87	1.47	3.13	25
S39	JT3.1	0.7	227	2.63	1.47	3.13	25
S40	JT3.1	0.6	208	2.1	1.47	3.13	25
S41	JT3.2	0.8	282	4.42	1.47	3.13	25
S42	JT3.2	3.4	362	3.15	1.47	3.13	25
S43	JT4	0.6	261	2.63	1.47	3.13	25
S44	JT4	0.8	266	3.47	1.47	3.13	25
S45	JT3.2	1.2	460	3.41	1.47	3.13	25
S46	JT3.2	0.7	280	3.68	1.47	3.13	25
S47	JS4.3	7.6	815	3.03	1.47	3.13	25
S48	JS4.3	2.3	634	2.17	1.47	3.13	25
S49	JP5	52.3	2334	2.18	1.47	3.13	25
S50	JP5	61.3	1851	2.4	1.47	3.13	25
S51	OUT1	62.9	1986	1.73	1.47	3.13	25
S52	OUT1	55.2	1527	1.96	1.47	3.13	25

[JUNCTIONS]

ID	Invert elevation (m)
JP1	898.84
JP2	895.04
JS1	911.56
JS2.1	887.77
JT1	893.9
JS2.2	870.66
JP3	856.78
JS3	919.63
JP4	830.86
JS4.1	888.48
JT2	877.39
JS4.2	860.97
JT3.1	890.97
JT4	885.8
JT3.2	873.97
JS4.3	852.97
JP5	825.12
OUT1	813.33

[CONDUITS]

ID	inlet node	outlet node	Length (m)	n	inlet offset (m)	outlet offset (m)	transect
CP1	JP1	JP2	165	0.1	0	0	Trans_CP1
CS1	JS1	JP2	290	0.1	0	0	Trans_CS1
CS2.1	JS2.1	JS2.2	580	0.1	0	0	Trans_CS2.1
CT1	JT1	JS2.2	400	0.1	0	0	Trans_CT1
CS2.2	JS2.2	JP3	980	0.1	0	0	Trans_CS2.2
CP2	JP2	JP3	1410	0.1	0	0	Trans_CP2
CS3	JS3	JP4	2310	0.08	0	0	Trans_CS3
CP3	JP3	JP4	2025	0.05	0	0	Trans_CP3
CS4.1	JS4.1	JS4.2	340	0.045	0	0	Trans_CS4.1
CT2	JT2	JS4.2	270	0.045	0	0	Trans_CT2
CT3.1	JT3.1	JT3.2	200	0.045	0	0	Trans_CT3.1
CT4	JT4	JT3.2	180	0.045	0	0	Trans_CT4
CS4.2	JS4.2	JS4.3	210	0.045	0	0	Trans_CS4.2
CT3.2	JT3.2	JS4.3	400	0.045	0	0	Trans_CT3.2
CP4	JP4	JP5	826	0.045	0	0	Trans_CP4
CS4.3	JS4.3	JP5	1428	0.045	0	0	Trans_CS4.3
CP5	JP5	OUT1	425	0.045	0	0	Trans_CP5

ANEXO A – Detalhamento das seções transversais

(Fonte: Collodel, 2009)

Figura 70 – Seção transversal CP1 e CS1.

Figura 71 – Seção transversal CP2.

Figura 72 – Seção transversal CS2 e CT1.

Figura 73 – Seção transversal CP3.

Figura 74 – Seção transversal CS3.

Figura 75 – Seção transversal CP4.

Figura 76 – Seção transversal CS4, CT2, CT3 e CT4.

Figura 77 – Seção transversal CP5.

ANEXO B – Eventos com precipitação mínima de 10mm

(Fonte: Collodel, 2009)

evento	data	início	término	precipitação total (mm)	duração (min)	intensidade (mm/h)	Tr (anos)
1	02/06/2004	16:20	16:31	10,1	11	55,09	0,37
2	02/06/2004	17:44	20:14	31,7	150	12,68	0,97
3	2/14/2004	07:45	14:02	36,2	377	5,76	1,05
4	2/14/2004	18:29	21:55	15,1	206	4,4	0,03
5	2/15/2004	00:01	03:38	17,1	217	4,73	0,06
6	2/16/2004	04:38	05:11	10	33	18,18	0,04
7	2/22/2004	20:01	07:04	29,3	663	2,65	0,34
8	2/23/2004	13:30	15:19	12,9	109	7,1	0,03
9	2/24/2004	19:39	00:46	20,7	307	4,05	0,11
10	03/01/2004	18:48	19:19	18,2	31	35,23	0,50
11	5/18/2004	06:01	10:58	10,6	297	2,14	0,01
12	5/23/2004	20:41	21:28	30,5	47	38,94	2,44
13	5/24/2004	20:01	02:11	14,5	370	2,35	0,02
14	06/12/2004	08:24	13:46	13,2	322	2,46	0,02
15	7/19/2004	14:07	16:28	15,8	141	6,72	0,05
16	10/13/2004	18:27	18:39	10,4	12	52	0,33
17	10/17/2004	06:57	12:18	21,9	321	4,09	0,13
18	10/19/2004	01:31	04:14	9,4	163	3,46	0,01
19	11/11/2004	09:40	12:56	30,2	196	9,24	0,67
20	11/15/2004	14:46	18:18	36,7	212	10,39	1,47
21	11/15/2004	21:28	03:21	11,9	413	1,73	0,01
22	11/18/2004	13:09	13:34	10,5	25	25,2	0,07
23	2/15/2005	09:54	10:32	10,5	38	16,58	0,04
24	2/26/2005	14:01	15:10	13,3	69	11,57	0,05
25	2/27/2005	16:32	19:55	16,7	203	4,94	0,05
26	3/15/2005	12:30	13:27	14,7	57	15,47	0,09
27	3/16/2005	06:13	11:55	58	342	10,18	8,07
28	3/17/2005	02:11	04:39	20	148	8,11	0,14
29	5/22/2005	02:23	06:59	16,1	276	3,5	0,04
30	5/24/2005	22:41	00:28	24	107	13,46	0,38
31	5/25/2005	03:32	08:09	18,2	277	3,94	0,07
32	8/15/2005	16:03	16:43	12	40	18	0,06
33	09/05/2005	04:03	05:48	12,9	105	7,37	0,03
34	10/05/2005	22:04	03:21	14,7	317	2,78	0,02
35	10/07/2005	20:37	23:29	40,5	172	14,13	2,52
36	10/22/2005	19:11	20:54	11,5	103	6,7	0,02
37	10/26/2005	22:29	23:51	13,6	82	9,95	0,04
38	10/29/2005	06:10	10:19	14,9	249	3,59	0,03
39	11/04/2005	20:45	22:56	19,6	131	8,98	0,14
40	11/06/2005	20:10	20:56	17,7	46	23,09	0,25
41	11/09/2005	15:28	16:46	20,2	78	15,54	0,24
42	11/19/2005	10:05	11:15	15	70	12,86	0,08
43	1/19/2006	02:01	03:54	30,9	113	16,41	1,07
44	1/29/2006	03:28	07:07	10,5	219	2,88	0,01
45	02/07/2006	13:27	13:48	17,6	21	50,29	0,87
46	02/10/2006	20:46	06:29	36,8	583	3,79	0,94
47	02/12/2006	00:29	23:58	11,2	1409	0,48	0,00
48	2/13/2006	00:24	03:16	13,3	172	4,64	0,02
49	2/15/2006	17:30	20:56	41,2	206	12	2,44
50	2/22/2006	01:09	03:57	13,2	168	4,71	0,02
51	2/27/2006	19:23	20:39	12,3	76	9,71	0,03
52	3/21/2006	00:34	04:50	50,3	256	11,79	5,06

53	3/23/2006	14:59	17:49	15,8	170	5,58	0,05
54	04/06/2006	17:04	19:55	17,2	171	6,04	0,07
55	6/26/2006	10:43	11:45	12,9	62	12,48	0,05
56	11/19/2006	15:56	17:32	12,5	96	7,81	0,03
57	12/04/2006	19:56	22:23	11,7	147	4,78	0,01