MARCUS VINÍCIUS GALBETTI

**Comparação dos modelos hidrológicos presentes no
SSD ABC6 aplicados a uma bacia urbana**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos (SP)

2015

MARCUS VINÍCIUS GALBETTI

**Comparação dos modelos hidrológicos presentes no
SSD ABC6 aplicados a uma bacia urbana**

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 Ciências: Engenharia Hidráulica e
Saneamento.

**Orientador: Prof. Dr. João Luiz Boccia
Brandão**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos (SP)

2015

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

Galbetti, Marcus Vinícius
G148c Comparação dos modelos hidrológicos presentes no
SSD ABC6 aplicados a uma bacia urbana / Marcus Vinícius
Galbetti; orientador João Luiz Boccia Brandão. São
Carlos, 2015.

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, 2015.

1. drenagem urbana. 2. SSD. 3. ABC6. 4. modelos
hidrológicos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MARCUS VINÍCIUS GALBETTI**.

Título da dissertação: "Coparação dos modelos hidrológicos presentes no SSD ABC6 aplicados a uma bacia urbana".

Data da defesa: 08/07/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **João Luiz Boccia Brandão**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Ademir Paceli Barbassa**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Prof. Dr. **Rubem La Laina Porto**
(Escola Politécnica/EP-USP)

APROVADO

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao Prof. Dr. João Luiz Boccia Brandão pela orientação e por todos os conselhos profissionais e pessoais recebidos. Muito obrigado pela oportunidade oferecida e pela confiança em mim depositada para a execução dessa pesquisa.

Aos integrantes da banca examinadora, pela disponibilidade em participar.

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

A Financiadora de Estudos e Projetos e Programas (Finep) pelo financiamento do projeto “HIDROECO – Hidrograma Ecológico e Modelagem Quali-Quantitativa de Bacias”.

Aos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento, que sempre me atenderam com eficiência e atenção.

Ao Marcelo Miky Mine, técnico do laboratório de Recursos Hídricos da EESC-USP, por ter me ajudado em praticamente todos os trabalhos de campo.

Ao pessoal do LABSIN e a todos os amigos que fiz durante minha estadia em São Carlos pelos momentos de descontração proporcionados.

À minha família, meus pais Antônio Marcos e Nilce e meu irmão Victor Hugo, pela paciência e todo suporte oferecido, fazendo possível a conclusão de mais uma etapa acadêmica.

A Taís Shinma, minha namorada, pelo amor, amizade, companheirismo e paciência em todos os momentos, em especial, durante a fase de conclusão da pesquisa.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram na realização deste trabalho.

“Aqui, no entanto, nós não olhamos para trás por muito tempo. Nós continuamos seguindo em frente, abrindo novas portas e fazendo coisas novas. Porque somos curiosos e a curiosidade continua nos conduzindo por novos caminhos. ”

Walt Disney

RESUMO

GALBETTI, M. V. **Comparação dos modelos hidrológicos presentes no SSD ABC6 aplicados a uma bacia urbana**. 2015. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

No Brasil, o processo de urbanização caracterizou-se pela falta de planejamento e infraestrutura adequada, potencializando os impactos advindos das enchentes e inundações. Para mitigá-los, é necessária a realização de estudos hidrológicos que busquem compreender e representar o comportamento da bacia hidrográfica frente aos eventos chuvosos. Uma das ferramentas mais utilizadas para a execução dessa tarefa são os Sistemas de Suporte à Decisão (SSDs) aplicados na área de recursos hídricos, destacando-se o Sistema de Suporte a Decisões para Análise de Ondas de Cheias em Bacias Complexas (ABC6). O ABC6 caracteriza-se por ser um software brasileiro, gratuito e apresentar diversos modelos de determinação da precipitação efetiva e de geração de hidrogramas sintéticos. Quando os dados hidrológicos da área de estudo, como precipitação e vazão, encontram-se disponíveis, os parâmetros desses modelos podem ser determinados. Caso contrário, faz-se necessário estima-los por meio de formulações empíricas, sendo questionável a aplicação dessas formulações em áreas com características diferentes às de sua determinação. Dessa forma, a proposta do presente trabalho consistiu em avaliar o desempenho dos modelos presentes no ABC6, utilizando suas formulações empíricas para estimar o tempo de concentração e os parâmetros dos modelos de precipitação efetiva e de geração de hidrogramas sintéticos de uma bacia hidrográfica em processo de urbanização. Os resultados obtidos colocaram em xeque a validade dos valores dos parâmetros sugeridos em literatura técnica, do modelo do SCS para a determinação da precipitação efetiva e das rotinas de cálculo do ABC6 para os modelos de Horton e de Green-Ampt. Os resultados demonstraram a necessidade da atualização das rotinas de cálculo presentes no ABC6, de forma a torná-lo mais robusto, e da elaboração de um manual técnico detalhado de suas rotinas computacionais, orientando ao usuário de forma a extrair o máximo de sua potencialidade em estudos hidrológicos. Demonstrou-se, também, a necessidade de estudos regionalizados, de forma a incorporar as características e peculiaridades de cada região aos parâmetros a serem utilizados.

Palavras Chave: drenagem urbana, SSD, ABC6, modelos hidrológicos

ABSTRACT

GALBETTI, M. V. Comparison of hydrological models present in the DSS ABC6 applied to an urban watershed. 2015. 130 p. Thesis (Master in Hydraulic Engineering and Sanitation) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2015.

In Brazil, the urbanization process was characterized by the lack of planning and adequate infrastructure, strengthening the arising of floods and flooding. In order to mitigate them, it is necessary to conduct hydrological studies that seek to understand and represent the behavior of the watershed when facing rainfall events. One of the most used tools to perform this task is the Decision Support Systems (DSS) applied in the water resources area, highlighting the Decision Support System for Flood Wave Analysis in Complex Watersheds (ABC6). The ABC6 is characterized by being a free Brazilian software and it presents many models to determine the effective precipitation and to generate synthetic hydrographs. When the hydrological data of the study area are available, such as precipitation and flow, the models parameters can be determined. Otherwise, it is necessary to estimate them through empirical formulations so that the application of these formulations is questionable in areas with different characteristics from those of their determination. Thus, the purpose of this study was to assess the performance of the models presented in ABC6 by using their empirical formulations in order to estimate the time of concentration and the model parameters of effective precipitation and synthetic hydrograph generation for a watershed in the process of urbanization. The results put into question the validity of the parameters values suggested in the technical literature of the SCS model, which is used for the effective precipitation determination and the ABC6 calculation routines for models of Horton and Green-Ampt. The results presented the need of updating the calculation routines presented in the ABC6 in order to make it more robust, and the need of the elaboration of a detailed technical manual of its computational routines, guiding the user in order to make the most of its potential in hydrological studies. In addition, it has been demonstrated a need for regionalized studies in order to incorporate the features and characteristics of each region to the parameters to be used.

Keywords: urban drainage, DSS, ABC6, hydrological models

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil esquemático do processo de enchente e inundação. Fonte: Brasil (2007).....	27
Figura 2 - Relação entre Área Urbanizada Acumulada e Número Acumulado de Ocorrências de inundações e alagamentos, com indicação de estágios de desenvolvimento urbano em São Carlos (SP). Fonte: Mendes e Mendiondo (2007).....	28
Figura 3 – Praça do Mercado Municipal de São Carlos durante o evento chuvoso do dia 23/10/2013. Fonte: São Carlos Agora (2013).....	29
Figura 4- Parâmetros de um hidrograma de ESD. Fonte: Adaptado de Silveira (2010).....	45
Figura 5- Hidrograma triangular do SCS. Fonte: Adaptado de Silveira (2010).	46
Figura 6 - Isócronas e histograma tempo-área. Fonte: Silveira (2010).....	48
Figura 7 – Localização geográfica da bacia do córrego do Mineirinho. Fonte: Angelini Sobrinha et al. (2014)..	54
Figura 8 - Sub-bacias da bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho. Fonte: Aprígio (2012).	55
Figura 9 - Rede de monitoramento hidrológico da bacia do córrego do Mineirinho.	57
Figura 10 - Entrada do trecho canalizado do córrego do Mineirinho localizado na Avenida Bruno Ruggiero Filho.	58
Figura 11 - Detalhe da grade de proteção e da sonda acústica, instalados no fundo do trecho canalizado do córrego do Mineirinho.	59
Figura 12 - Mapa de uso e ocupação do solo elaborado a partir de imagem de alta resolução. Fonte: Paulino (2014).	65
Figura 13 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 1.	99
Figura 14 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 2.	99
Figura 15 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 3.	100
Figura 16 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 4.	100
Figura 17 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 5.	101
Figura 18 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 6.	101
Figura 19 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 7.	102
Figura 20 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 8.	102
Figura 21 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 9.	103
Figura 22 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 10.	103
Figura 23 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 11.	104
Figura 24 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 12.	104
Figura 25 - Representação do Método dos Polígonos de Thiessen para a Situação 1.	106
Figura 26- Representação do Método dos Polígonos de Thiessen para a Situação 2.	107
Figura 27 – Representação do Método dos Polígonos de Thiessen para a Situação 3.....	108
Figura 28 – Evento 1 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.	110
Figura 29 – Evento 2 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.	110
Figura 30 - Evento 3 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.....	111
Figura 31 - Evento 4 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.....	111
Figura 32 - Evento 5 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.....	112

Figura 33 - Evento 6 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.	112
Figura 34 - Evento 7 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.	113
Figura 35 - Evento 8 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.	113
Figura 36 - Evento 9 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.	114
Figura 37 - Evento 10 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.	114
Figura 38 - Evento 11 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.	115
Figura 39 - Evento 12 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.	115
Figura 40 - Evento 1 simulado pelo modelo de Clark – KCl Sabol.	117
Figura 41 - Evento 2 simulado pelo modelo de Clark – KCl Sabol.	117
Figura 42 - Evento 3 simulado pelo modelo de Clark – KCl Sabol.	118
Figura 43 - Evento 4 simulado pelo modelo de Clark – KCl Sabol.	118
Figura 44 - Evento 5 simulado pelo modelo de Clark – KCl Sabol.	119
Figura 45 - Evento 6 simulado pelo modelo de Clark – KCl Sabol.	119
Figura 46 - Evento 7 simulado pelo modelo de Clark – KCl Sabol.	120
Figura 47 - Evento 8 simulado pelo modelo de Clark – KCl Sabol.	120
Figura 48 - Evento 9 simulado pelo modelo de Clark – KCl Sabol.	121
Figura 49 - Evento 10 simulado pelo modelo de Clark – KCl Sabol.	121
Figura 50 - Evento 11 simulado pelo modelo de Clark – KCl Sabol.	122
Figura 51 - Evento 12 simulado pelo modelo de Clark – KCl Sabol.	122
Figura 52 - Evento 1 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.	124
Figura 53 - Evento 2 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.	124
Figura 54 - Evento 3 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.	125
Figura 55 - Evento 4 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.	125
Figura 56 - Evento 5 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.	126
Figura 57 - Evento 6 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.	126
Figura 58 - Evento 7 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.	127
Figura 59 - Evento 8 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.	127
Figura 60 - Evento 9 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.	128
Figura 61 - Evento 10 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.	128
Figura 62 - Evento 11 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.	129
Figura 63 - Evento 12 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formulações de Tempo de Concentração presentes no ABC6.	35
Tabela 2 - Coeficiente de rugosidade da equação de Kerby em função do tipo de uso do solo.	37
Tabela 3 – Parâmetros da equação de Horton, segundo classificação hidrológica dos solos propostas pelo SCS.	42
Tabela 4 – Valores de taxa de infiltração mínima do solo em função do tipo de solo.	42
Tabela 5 – Valores de taxa de infiltração máxima do solo em função do tipo de solo.	42
Tabela 6 – Correspondência entre CN e os parâmetros de Green-Ampt.	44
Tabela 7 – Parâmetros fisiográficos da bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho.	56
Tabela 8 – Descrição dos pontos da rede de monitoramento hidrológico da EESC-USP.	57
Tabela 9 - Resumo dos eventos de chuva e vazão coletados pela rede de monitoramento hidrológico.	61
Tabela 10 - Área de influência dos pluviógrafos segundo o Método de Thiessen para cada situação.	61
Tabela 11 - Resumo dos dados de entrada necessários para aplicação das formulações de Tc, do ABC6.	62
Tabela 12 - Erros das fórmulas de Tc.	63
Tabela 13 – Tc calculados a partir da formulação de Kirpich para a bacia do Mineirinho.	63
Tabela 14 - Valores das áreas e de CN para cada sub-bacia.	66
Tabela 15 - Valores de CN para cada sub-bacia em diferentes condições anteriores ao escoamento, segundo o modelo do SCS.	66
Tabela 16 - Conjunto de parâmetros propostos para o modelo de Horton.	67
Tabela 17 - Valores de Z e K do modelo de Green-Ampt estimados a partir de valores de CN do solo da bacia do Mineirinho, em diferentes CAE.	68
Tabela 18 – Parâmetros do modelo de Clark para cada sub-bacia do córrego do Mineirinho segundo a equação de Sabol.	70
Tabela 19 – Valores determinados para os parâmetros do modelo de Santa Bárbara, para cada sub-bacia do córrego do Mineirinho.	70
Tabela 20 – ESD observado e estimado pela aplicação do modelo do SCS e diferença percentual.	73
Tabela 21 – ESD observado e estimado pela aplicação do modelo de Horton, com F(t) igual a 30 mm, e diferença percentual.	75
Tabela 22 - Valores de F(t) determinados por calibração manual para os conjuntos de parâmetros 1 e 2 propostos para o modelo de Horton.	76
Tabela 23 - ESD estimado pela aplicação do modelo de Horton, com F(t) calibrado, e diferença percentual.	76
Tabela 24 – ESD observado e estimado pela aplicação do modelo de Green-Ampt e diferença percentual.	78
Tabela 25 - ESD observado e estimado pela aplicação do modelo do Índice ϕ e diferença percentual, parte I. ...	79
Tabela 26 - ESD observado e estimado pela aplicação do modelo do Índice ϕ e diferença percentual, parte II. ...	80
Tabela 27 – Melhores valores de ϕ para cada evento simulado, determinados por calibração manual.	81
Tabela 28 - Síntese dos resultados obtidos nos modelos de determinação de precipitação efetiva.	82
Tabela 29 – Variação da vazão de pico dos hidrogramas gerados utilizando o modelo de Horton.	83
Tabela 30 – Variação da vazão de pico dos hidrogramas gerados a partir do Índice ϕ	84
Tabela 31 - Diferença entre os valores do coeficiente de amortecimento de Sabol e da constante de Santa Bárbara.	85

Tabela 32 – Número de eventos simulados com Q_p dentro da faixa proposta.	85
Tabela 33 – Variação do tempo de pico dos hidrogramas gerados a partir do modelo de Horton.....	85
Tabela 34 – Variação do tempo de pico dos hidrogramas gerados a partir do Índice ϕ	86
Tabela 35 – Número de eventos simulados com T_p dentro da faixa proposta em metodologia.	86
Tabela 36 – Variação do tempo de base dos hidrogramas gerados a partir do modelo de Horton.....	87
Tabela 37 – Variação do tempo de base dos hidrogramas gerados a partir do modelo do Índice ϕ	88
Tabela 38 – Número de eventos simulados com T_b dentro da faixa proposta em metodologia.	88
Tabela 39 - Síntese dos resultados obtidos nos modelos de geração de hidrogramas sintéticos.	89
Tabela 40 - Valores de CN para áreas urbanas.	131
Tabela 41 - Valores de CN para áreas agrícolas.	132
Tabela 42 - Valores de CN para outros tipos de áreas agrícolas.	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC6	Sistema de Suporte a Decisões para Análise de Ondas de Cheias em Bacias Complexas
ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
CABC	Versão Comercial do ABC6
CAE	Condição de umidade anterior ao escoamento
CDCC	Centro de Divulgação Científica e Cultural
CLiv	Condutos Livres e Áreas Inundáveis
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EUA	Estados Unidos da América
FCTH	Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica
HU	Hidrograma Unitário
LabSid	Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões em Engenharia de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental
LabSin	Laboratório de Simulação Numérica
MCS	Modelo do Hidrograma de Clark, utilizando a constante de Sabol
MHT	Modelo do Hidrograma Triangular do SCS
MSB	Modelo de Santa Bárbara
NRCS	<i>Natural Resources Conservation Service</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i> , atual NRCS
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SSD	Sistema de Suporte à Decisão
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔESD	diferença percentual entre o escoamento superficial direto estimado e o observado
Δh	diferença de cotas, em m
ΔQ_p	diferença percentual entre vazão de pico estimada e observada
Δt	intervalo de discretização dos cálculos
ΔT_b	diferença percentual entre tempo de base estimado e observado
ΔT_p	diferença percentual entre tempo de pico estimado e observado
A	área da bacia, em km ²
A_{ac}	área acumulada da bacia, em km ²
$A_{iso(t)}$	área da bacia delimitada pelas linhas isócronas, no instante t, em km ²
ARM	índice de armazenamento d'água no solo da bacia, em mm
C	coeficiente de amortecimento do reservatório linear, em função de K_{Cl}
c	rugosidade de retardo
CN	número de deflúvio do modelo do SCS
CN_I	número de deflúvio do modelo do SCS para condição I
CN_{III}	número de deflúvio do modelo do SCS para condição III
d	duração da precipitação efetiva
ESD	escoamento superficial direto
ESD_{est}	ESD estimado, decorrente da escolha dos parâmetros e do modelo de determinação de precipitação efetiva, em m ³
ESD_{obs}	ESD observado, em m ³
$F_{(t)}$	infiltração acumulada no solo no instante t, em mm
$f_{(t)}$	taxa de infiltração no solo, no instante t, em mm/h
f_c	taxa de infiltração mínima no solo, para $t = \infty$, em mm/h
f_o	taxa de infiltração máxima no solo, para $t = 0$, em mm/h
H_f	sucção capilar exercida pelo solo, em mm
H_o	altura da lâmina d'água depositada sobre o solo, em mm
i	intensidade da precipitação, em mm/h
$I_{(t - \Delta t)}$	hidrograma instantâneo, no instante $t - \Delta t$, em m ³ /s
$I(t)$	hidrograma instantâneo, no instante t, em m ³ /s

I_a	abstrações iniciais na bacia, em mm
k	coeficiente de decaimento da infiltração, em horas ⁻¹
K	condutividade hidráulica, em mm/h;
K_{Cl}	constante de propagação do modelo de Clark
K_{SB}	constante de propagação do modelo de Santa Bárbara
L	extensão total do percurso hidráulico/talvegue, em m
L_i	extensão horizontal do trecho considerado, em m
L_t	comprimento do talvegue, em m
N	número de bacias considerado na análise
n	rugosidade de Manning;
n_f	fator de forma do modelo de Clark
N_{pt}	número de passos temporais
$N_{trechos}$	número de trechos retilíneos considerados
$P_{(t)}$	precipitação total, no intervalo t, em mm
$P_{ac(t)}$	precipitação total acumulada, no instante t, em mm
$P_{e(t)}$	precipitação efetiva, no instante t, em mm
ESD_{unit}	escoamento superficial direto unitário, em mm
$Q_{(t)}$	vazão no exutório, no instante t, em m ³ /s
$Q_{(t-\Delta t)}$	vazão no exutório, no instante t- Δt , em m ³ /s
$Q_{p\ obs}$	vazão de pico observada, em m ³ /s
$Q_{p\ est}$	vazão de pico estimada, decorrente da escolha do modelo de geração de hidrograma sintético, em m ³ /s
Q_p	vazão de pico
S_b	declividade equivalente da bacia, em m/km
S_{eq}	declividade equivalente, em m/m
S_i	declividade média em cada trecho, em m/m, sendo o quociente entre a diferença de cotas (Δh) no trecho e sua respectiva extensão
S_t	declividade do talvegue, em m/km
t	tempo decorrido, em horas
T_A	tempo de ascensão

T_b	tempo de base
$T_{b\text{ obs}}$	tempo de base observado
$T_{b\text{ est}}$	tempo de base estimado, decorrente da escolha do modelo de geração de hidrograma sintético
T_c	tempo de concentração
T_p	tempo de pico
$T_{p\text{ obs}}$	tempo de pico observado
$T_{p\text{ est}}$	tempo de pico estimado, decorrente da escolha do modelo de geração de hidrograma sintético
T_R	tempo de retardo
$V_{(t)}$	volume armazenado temporariamente, no instante t, em m ³
Z	sucção exercida pela camada superior do solo, em mm
Δt	intervalo de discretização dos cálculos
θ_i	quantidade de água inicial do solo, expressa em fração de volume do solo
θ_n	água contida no solo nas condições naturais de saturação, expressa em fração de volume do solo;
ϕ	razão constante de infiltração, em mm/h

SUMÁRIO

1	Introdução.....	25
2	Objetivos.....	26
2.1	Objetivo Geral.....	26
2.2	Objetivos específicos	26
3	Revisão Bibliográfica	27
3.1	O problema das enchentes e inundações.....	27
3.2	Sistemas de Suporte à Decisão aplicados em estudos hidrológicos	29
3.3	Sistema de Suporte a Decisões para Análise de Ondas de Cheias em Bacias Complexas (ABC6)	31
4	Formulações e Modelos hidrológicos do ABC6	34
4.1.1	Fórmulas para cálculo do Tempo de Concentração (T_c)	34
4.1.2	Modelos para determinação da Precipitação Efetiva.....	38
4.1.2.1	Modelo do SCS	38
4.1.2.2	Modelo de Horton	41
4.1.2.3	Modelo de Green-Ampt	42
4.1.2.4	Modelo do Índice ϕ	44
4.1.3	Modelos de geração de Hidrogramas Sintéticos.....	44
4.1.3.1	Modelo do Hidrograma Triangular do SCS.....	46
4.1.3.2	Modelo de Clark	47
4.1.3.3	Modelo de Santa Bárbara.....	50
5	Materiais e Métodos	52
5.1	Área de estudo	53
5.1.1	Determinação de parâmetros fisiográficos das sub-bacias do Mineirinho	55
5.2	Rede de monitoramento hidrológico.....	56
5.2.1	Eventos Selecionados	59
5.3	Estimativa dos parâmetros hidrológicos da bacia do Mineirinho para simulação no ABC6	62
5.3.1	Estimativa do Tempo de Concentração	62
5.3.2	Parâmetros de cálculo de Precipitação Efetiva.....	64
5.3.2.1	Estimativa do valor de CN.....	64
5.3.2.2	Estimativa dos parâmetros do modelo de Horton	67
5.3.2.3	Estimativa dos parâmetros do modelo de Green-Ampt	68
5.3.2.4	Estimativa do parâmetro ϕ	68
5.3.2.5	Avaliação de desempenho dos modelos de determinação de precipitação efetiva	68
5.3.3	Modelos de geração de Hidrogramas Sintéticos.....	69

5.3.3.1	Modelo do Hidrograma Triangular do SCS	69
5.3.3.2	Modelo de Clark	69
5.3.3.3	Modelo de Santa Bárbara	70
5.3.3.4	Avaliação de desempenho dos modelos de geração de hidrogramas sintéticos.	70
6	Resultados e Discussão	72
6.1	Tempo de Concentração	72
6.2	Precipitação efetiva	72
6.2.1	Modelo do SCS	73
6.2.2	Modelo de Horton	75
6.2.3	Modelo de Green-Ampt	78
6.2.4	Modelo do Índice ϕ	79
6.2.5	Avaliação geral dos modelos de determinação de precipitação efetiva.....	81
6.3	Geração de hidrogramas sintéticos	82
6.3.1	Vazão de pico.....	83
6.3.2	Tempo de pico.....	85
6.3.3	Tempo de base	87
6.3.4	Avaliação geral dos modelos de geração de hidrogramas sintéticos	88
7	Conclusões e Recomendações	90
8	Referências Bibliográficas	92
	Apêndice A – Hietogramas e Hidrogramas observados em campo.....	98
	Apêndice B - Método dos Polígonos de Thiessen Para Cada Situação	105
	Apêndice C – Hidrogramas Sintéticos gerados a partir do Modelo do Hidrograma Triangular do SCS.....	109
	Apêndice D – Hidrogramas Sintéticos gerados a partir do modelo de Clark – Constante de Sabol	116
	Apêndice E – Hidrogramas Sintéticos gerados a partir do modelo de Santa Bárbara	123
	ANEXO – 1: Valores de CN para diferentes tipos de uso do solo (USDA, 2004).....	130

1 INTRODUÇÃO

A expansão urbana ocorrida no Brasil, principalmente após a segunda metade do século XX, caracterizou-se por não apresentar planejamento e infraestrutura adequada, provocando um crescimento desordenado dos centros urbanos.

Canholi (2005) cita que esse crescimento foi marcado pela impermeabilização de grandes áreas, supressão das matas ciliares e ocupação irregular dos leitos dos rios. Essas ações reduziram a parcela de chuva que infiltra no solo, intensificando os impactos causados pela ocorrência de eventos chuvosos, como enchentes e inundações. Para amenizá-los, é necessário compreender e representar o comportamento da bacia hidrográfica, frente a um evento chuvoso. Esse entendimento visa subsidiar estudos de planejamento, como os referentes à proposição de obras hidráulicas ou delimitação de áreas de inundação.

Diversas ferramentas computacionais encontram-se disponíveis para a consecução dessa tarefa, destacando-se os Sistemas de Suporte à Decisão (SSDs) em recursos hídricos. Os SSDs são sistemas que integram uma base de dados e de modelos matemáticos a uma interface computacional, permitindo ao usuário avaliar o comportamento de um sistema em diferentes condições. Dentre os SSDs disponíveis para a área de recursos hídricos, destaca-se o Sistema de Suporte a Decisões para Análise de Ondas de Cheias em Bacias Complexas (ABC6), software brasileiro, gratuito, de simulação dinâmica da transformação chuva-vazão (OLIVEIRA et al., 1999).

O ABC6 destaca-se por apresentar diferentes modelos para estimar a precipitação efetiva e o correspondente hidrograma de cheia. A utilização desses modelos, por sua vez, deve ser condicionada ao conhecimento de seus parâmetros e respectivos limites de uso e aplicação. Caso esses limites não sejam obedecidos, a qualidade da representação do sistema bacia hidrográfica pode estar comprometida e, conseqüentemente, levar a escolha de decisões equivocadas durante as etapas posteriores do estudo hidrológico.

Portanto, o profissional de recursos hídricos deve escolher com cordura os modelos hidrológicos e seus respectivos parâmetros, propondo as melhores soluções para a área de estudo. Entretanto, esse processo não é trivial devido à dificuldade de estimar valores que representem adequadamente diferentes áreas, sobretudo as áreas urbanas. A presente pesquisa, por sua vez, expõe essa dificuldade e busca prover o profissional de recursos hídricos de informações para levá-lo a melhor escolha desses parâmetros.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar o desempenho dos modelos hidrológicos presentes no ABC6 em representar a transformação chuva vazão, comparando os resultados do SSD com os dados observados em uma bacia hidrográfica em processo de urbanização.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho consistem em:

- Realizar uma análise crítica das fórmulas de estimativa de tempo de concentração;
- Realizar uma análise crítica dos modelos de estimativa de precipitação efetiva;
- Realizar uma análise crítica dos modelos de geração de hidrogramas sintéticos;
- Gerar recomendações técnicas que orientem o uso do ABC6, como ferramenta de auxílio no planejamento e gestão de áreas urbanas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O problema das enchentes e inundações

Quando a precipitação atinge a superfície de uma bacia hidrográfica várias são suas interações, sendo que parte retorna à atmosfera por evapotranspiração; parte é interceptada pela vegetação presente; parte é retida superficialmente, por meio das depressões e características do relevo local; parte infiltra, contribuindo para os escoamentos subsuperficial e subterrâneo; e, por fim, parte escoam superficialmente até chegar aos corpos d'água. A proporção entre essas 3 formas de escoamento depende da natureza da superfície e varia ao longo da tormenta, sendo que as águas que escoam superficialmente chegam mais rapidamente à rede de drenagem.

Ao urbanizar a bacia hidrográfica, o homem impõe uma série de modificações que alteram essa dinâmica natural. Essas alterações resultam na diminuição do volume infiltrado e, conseqüentemente, o aumento do volume escoado superficialmente. Segundo Porto (1995), aumentos da ordem de 300 a 400% não são incomuns durante o processo de urbanização.

Esse processo caracterizou-se pela apropriação das melhores áreas das cidades pelo mercado imobiliário e pela ausência, quase que completa, de áreas destinadas à moradia popular. Isto acarretou a apropriação pela população, especialmente a de baixa renda, de áreas naturalmente sujeitas a enchentes e inundações. Entende-se por enchente a elevação temporária do nível d'água em um canal de drenagem; e por inundação, o processo de extravasamento das águas do canal de drenagem para as áreas marginais (várzeas). Esses fenômenos hidrológicos são representados na Figura 1 (BRASIL, 2007).

Figura 1 - Perfil esquemático do processo de enchente e inundação. Fonte: Brasil (2007).

As enchentes e inundações figuram entre os principais tipos de desastres naturais que afligem as áreas urbanas e causam diversos tipos de impactos. Estes variam desde impactos de caráter econômico - como os danos causados à infraestrutura urbana, à propriedade e a especulação do mercado imobiliário - aos impactos de cunho social e ambiental - como a

veiculação de doenças, a degradação da qualidade e a perda de vidas (HADDAD & TEIXEIRA, 2013).

No Brasil, a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, realizada em 2008, constatou que dos 2.274 municípios que declararam problemas de drenagem urbana nos últimos 5 anos, 1.381 informaram haver ocupação em áreas naturalmente inundáveis e 1.094 municípios informaram a existência de ocupações irregulares em áreas de várzea (IBGE, 2010). Esses problemas afetaram cerca de 1,6 milhão de pessoas e foram responsáveis por 1.484 mortes apenas entre os anos de 2010 e 2014 (EM-DAT, 2014).

Em São Carlos (SP), o processo de urbanização também seguiu a tendência nacional e ocorreu sem o correto planejamento. Mendes e Menciondo (2007), ao estudar as inundações e enchentes no Mercado Municipal de São Carlos, localizado na bacia hidrográfica do córrego do Gregório, relatam que sua intensa urbanização gerou grandes impactos no sistema de escoamento resultando no expressivo aumento de enchentes, apesar da área urbanizada não aumentar na mesma proporção (Figura 2).

Figura 2 - Relação entre Área Urbanizada Acumulada e Número Acumulado de Ocorrências de inundações e alagamentos, com indicação de estágios de desenvolvimento urbano em São Carlos (SP). Fonte: Mendes e Menciondo (2007).

Portanto, notícias veiculadas relatando prejuízos causados por enchentes na Praça do Mercado Municipal de São Carlos e em diversos pontos da cidade ainda são frequentes. No dia 23/10/2013, por exemplo, uma precipitação com lâmina total de 105 mm com duração de 2 horas e 20 minutos foi responsável por danos em 19 residências, 32 estabelecimentos comerciais e pela coleta de, aproximadamente, 40 toneladas de lixo (São Carlos Agora, 2013). A Figura 3 mostra a situação dessa praça durante esse evento chuvoso.

Figura 3 – Praça do Mercado Municipal de São Carlos durante o evento chuvoso do dia 23/10/2013. Fonte: São Carlos Agora (2013).

Para mitigar esse tipo de problema, é necessário realizar estudos hidrológicos que subsidiem o planejamento e possíveis intervenções na bacia hidrográfica. Dentre as diversas ferramentas disponíveis para a realização desse tipo de estudo, destaca-se o uso de SSDs aplicados em estudos hidrológicos.

3.2 Sistemas de Suporte à Decisão aplicados em estudos hidrológicos

Segundo Braga, Barbosa e Nakayama (1998), as soluções para os diferentes problemas presentes nos centros urbanos não mais se pautam, apenas, em termos econômicos. Com a adoção do conceito de desenvolvimento sustentável, percebe-se que durante a concepção de estudos hidrológicos, devem-se considerar os múltiplos usos da água. Esse requisito leva a uma articulação de compromissos entre os diferentes setores da sociedade, que geralmente apresentam objetivos conflitantes.

Para o cumprimento dessa tarefa, uma das ferramentas mais empregadas atualmente são os Sistemas de Suporte à Decisão (SSDs). Os SSDs são definidos como sistemas computacionais que integram uma base de dados a modelos matemáticos, por meio de uma interface gráfica. Essa característica tem por objetivo auxiliar o processo de tomada de decisão, a partir dos dados e informações disponíveis. Ressalta-se que o propósito de um SSD não é substituir o papel do tomador de decisão, mas fornecer meios para se tomar a decisão satisfatória em tempo hábil (AHMAD & SIMONOVIC, 2006; PORTO & AZEVEDO, 2002).

Shourian, Mousavi e Tahershamsi (2007), por exemplo, propuseram um SSD que integra um modelo, que simula as características de um sistema de aproveitamento de recursos hídricos, a um algoritmo de otimização. A resultante da integração foi possibilitar aos tomadores de decisão avaliar quais alternativas atenderiam satisfatoriamente as questões

econômicas, ambientais e sociais levantadas previamente à intervenção, em uma bacia hidrográfica do Irã.

Pereira, Kayser e Collischonn (2012) propõem um SSD que integra ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) à modelagem hidrológica, facilitando a análise de pedidos de outorga de uso da água. Sua principal vantagem foi a automatização do processo de análise de disponibilidade hídrica, que era realizado de forma manual e isolada e, portanto, sujeito a erros e inconsistências.

Os exemplos citados enfatizam a estratégia de construção de um SSD proposta por Porto e Azevedo (2002). Segundo esses autores, um SSD deve ser capaz de induzir às melhores decisões e não se centrar no uso das melhores e mais avançadas técnicas. Por isso, não existe uma metodologia pronta para sua construção, mas devem-se combinar criativamente as técnicas já existentes, aprimorando as ferramentas disponíveis. A estrutura típica de um SSD contempla, resumidamente, os seguintes componentes:

- Base de Dados – reúne as informações sobre o problema, gerencia-as de forma adequada e torna-as disponíveis aos outros componentes do sistema;
- Base de Modelos – contém os instrumentos conceituais necessários à análise e formulação de alternativas de solução do problema em questão;
- Base de Conhecimento – incorpora ao SSD informações que não são passíveis de tratamento pelas bases citadas anteriormente, como a experiência dos usuários;
- Módulo de Diálogo – permite ao usuário inserir as entradas no SSD e este fornecer as saídas de forma clara e concisa.

Dos 4 componentes, destaca-se a Base de Modelos. O modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência hidrológica dispõe para melhor entender, representar e simplificar o comportamento da bacia hidrográfica. Destacam-se os modelos relacionados à transformação da precipitação em vazão, denominados modelos chuva-vazão.

Segundo Tucci (2005) e Silveira (2010), esses modelos devem descrever a área de estudo e suas características, permitindo que os dados de entrada variem no espaço e/ou no tempo. Para representar essa variação, é recomendável dividir a bacia hidrográfica em unidades menores, denominadas sub-bacias, e realizar a aquisição dos dados necessários, como as características físicas da área de estudo, as variáveis de entrada e os parâmetros dos modelos.

Para o uso correto de um modelo chuva-vazão e, conseqüentemente, do SSD, deve-se atentar quanto ao conhecimento de suas limitações que podem ser decorrentes da: representação

dos fenômenos; qualidade e quantidade de dados disponíveis; dos modelos de simulação, entre outros.

Neste trabalho, foram abordadas as limitações e aplicabilidade de diferentes modelos hidrológicos disponíveis no software ABC6, que serão detalhados no item 4. O ABC6 foi escolhido por ser um software brasileiro, gratuito e de fácil utilização, que vem sendo utilizado em diversas pesquisas, conforme apresentado no item a seguir.

3.3 Sistema de Suporte a Decisões para Análise de Ondas de Cheias em Bacias Complexas (ABC6)

Com base na premissa de fornecer uma ferramenta que auxilie a tomada de decisão e o planejamento de recursos hídricos, o Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões em Engenharia de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental (LabSid) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) desenvolveu o ABC6.

O ABC6 é um SSD que permite a simulação da transformação chuva-vazão. Sua formulação matemática é fundamentada em modelos de determinação de precipitação efetiva e de geração de hidrogramas de escoamento superficial direto consagrados em literatura. Essa característica permite o estudo de bacias múltiplas (também denominadas complexas) e a criação de diversos cenários que auxiliam significativamente a tomada de decisões quando da obtenção de hidrogramas de cheia. Esse software encontra-se disponível para download, gratuitamente, no seguinte endereço eletrônico: <http://www.labsid.eng.br/software.aspx?id=8> (acesso em 11/06/2014).

Até o momento foram desenvolvidas as seguintes versões desse SSD: ABCx (1985), ABC4 (1990), ABC5 (1996), ABC6 (2000) e a versão comercial CABAC, desenvolvida pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH).

Devido a sua facilidade de uso, esse SSD tem sido empregado em uma gama de aplicações que envolvem a simulação chuva-vazão. A seguir, são apresentados alguns desses trabalhos.

Brandão e Barros (2007) delimitaram as áreas de inundação da bacia hidrográfica do córrego do Bananal, localizada em São Paulo (SP), por meio do uso conjunto dos softwares CABAC (modelagem hidrológica) e CLiv (software desenvolvido pela FCTH para modelagem hidráulica). As características físicas da bacia e as ocupações irregulares ao longo de seus leitos fazem com que a área de estudo apresente problemas de enchentes e inundações. Como agravante desses fenômenos, tem-se o efeito do remanso causado pelo reservatório de retenção do córrego do Bananal. De forma a mitigar esses problemas, os autores delimitaram as manchas

de inundação da bacia para diferentes tempos de retorno. Os resultados obtidos serviram de base para a proposição de alternativas de melhorias, como: implantação de um reservatório de detenção no córrego Corumbé; melhorias na seção de escoamento do córrego; a proposição de um Parque Linear, na área correspondente à inundação com período de retorno de 25 anos; e relocação da população residente.

Santos, Assis e Silva (2007) propuseram uma solução de drenagem de baixo impacto, em uma bacia hidrográfica urbana. A área de estudo é a bacia endorreica da Lagoa do Buracão, situada em João Pessoa (PB), que apresenta funcionamento semelhante a um reservatório de detenção. Apoiados por simulações executadas no ABC6, os autores propuseram uma solução para a drenagem urbana do local que atenda a 3 critérios: menor intervenção física possível, aumento da eficiência hidráulica do efeito de piscinão da bacia e integrar o local às necessidades públicas de lazer e recreação. O resultado obtido foi um espaço urbano público multifuncional que permite o aproveitamento social e ambiental da área em questão.

Santana, Aguiar Netto e Mélo Júnior (2007) buscaram compreender os efeitos do pico de vazão sobre obras hidráulicas, como pontes e barragens. Os autores realizaram um estudo de caso nas obras localizadas ao longo da rodovia SE-206, inserida na bacia hidrográfica do rio Jacaré, próxima ao município de Poço Redondo (SE). Por meio de simulações de uma série de eventos críticos de precipitação no ABC6, os autores estimaram a vazão máxima na área de estudo e avaliaram 2 cenários de possíveis condições das pontes. Nos 2 cenários, segundo os autores, constataram-se falhas de projeto. No primeiro, caracterizado pela seção do rio apresentar-se livre, a velocidade de escoamento foi superior ao limite permitido, podendo ter afetado os aterros desprotegidos nas obras de cabeceiras da ponte. No segundo cenário, caracterizado por apresentar 20% da seção obstruída, o excesso de velocidade veio acompanhado por um brusco aumento do nível d'água.

Burchales e Silva (2007) avaliaram a alteração no volume de água pluvial drenado decorrente da construção de um empreendimento habitacional horizontal, propondo medidas mitigadoras. O empreendimento localiza-se em Londrina (PR) e as medidas adotadas foram o uso de trincheiras de infiltração. Estas estruturas apresentam como objetivo armazenar e infiltrar as águas precipitadas sobre todo, ou em parte, do lote, o que causa o retardamento dos picos dos hidrogramas de cheias em bacias urbanizadas. A partir de simulações executadas no ABC6, os autores demonstraram ser possível reduzir em até 41% o volume escoado superficialmente. Reduziu-se, também, em 42% a vazão de pico e aumentou-se em 10% o tempo de pico do hidrograma.

Pinto e Martins (2010) estudaram os efeitos causados pela construção de reservatórios de retenção em bacias urbanas. O emprego dessas estruturas visa a atender o princípio de Impacto Zero, adotado na gestão de drenagem urbana sustentável. Segundo esse princípio, o melhor sistema de drenagem é aquele que conduz o escoamento superficial direto sem gerar impactos superiores aos naturais, tanto a montante como a jusante do ponto de interesse. Os critérios de projeto, para a implantação dessas estruturas, correspondem a áreas disponíveis na bacia ou que a necessidade de relocação de pessoas seja mínima. Auxiliados pelo CABC, os autores propuseram 3 cenários para 3 sub-bacias hidrográficas da área de estudo, cuja localização não foi apresentada. Os cenários propostos correspondem, respectivamente, à situação de pré-urbanização, atual e futura, para um horizonte de projeto de 100 anos. A partir dos resultados das simulações, Pinto e Martins (2010) observaram que a construção de 3 reservatórios, que juntos reservem 23% do volume total precipitado, são capazes de regularizar a vazão da bacia atendendo ao princípio supracitado.

Silveira (2010), em sua dissertação de mestrado, realizou uma análise de sensibilidade dos dados de entrada dos modelos e fórmulas do ABC6. A autora analisou a variação da vazão de pico, tempo de pico, tempo de base e outros componentes do hidrograma sintético resultante, em função de dados de entrada, como: área de drenagem, tempo de concentração e número de deflúvio (*Curve Number* – CN do modelo de cálculo da precipitação efetiva do *Soil Conservation Service* – SCS dos EUA) de uma bacia fictícia. Como recomendação, a autora sugere a realização de análises prévias de sensibilidade dos modelos a serem usados em estudos hidrológicos.

Nakayama *et al.* (2011) apresentaram um estudo comparativo dos valores de CN obtidos pela calibração do modelo de determinação de precipitação efetiva do Soil Conservation Service (SCS) com os sugeridos em literatura. Utilizando o ABC6 como ferramenta de cálculo, os autores calibraram o valor de CN para 2 bacias hidrográficas, sendo a primeira predominantemente rural e a segunda, altamente urbanizada. Os resultados obtidos pela calibração do CN mostraram-se, respectivamente, 13,5% e 9,7% maiores que os valores sugeridos em literatura.

Silveira (2010) e Nakayama *et al.* (2011) indicaram a necessidade de estudo da adequabilidade das formulações SCS à aplicação do modelo na área de estudo. Entretanto, esses 2 autores não consideraram a possibilidade de uso e combinação dos diferentes modelos para a estimativa da precipitação efetiva e geração de hidrogramas presentes no ABC6, que é o objeto deste estudo. A seguir, as opções de modelos presentes no ABC6 são apresentadas, sendo indicados seus limites de uso e aplicação.

4 FORMULAÇÕES E MODELOS HIDROLÓGICOS DO ABC6

Para a determinação dos hidrogramas de cheia de uma bacia hidrográfica, faz-se necessário o uso dos dados hidrológicos, como a precipitação e vazão dos cursos d'água da área de estudo. Apesar de sua importância, esses dados não se encontram prontamente disponíveis, sobretudo os referentes à vazão, apesar dos esforços realizados por diversos órgãos públicos, como a Agência Nacional de Águas (ANA), a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e diversas universidades que operam instrumentos de coleta de dados.

A ANA, por exemplo, é responsável por coordenar as atividades desenvolvidas no âmbito da Rede Hidrometeorológica Nacional. Essa rede é composta de 4.633 estações pluviométricas e fluviométricas totalizando 2.176 dos 12.978 rios cadastrados no Sistema de Informações Hidrológicas da ANA. Frisa-se, entretanto, que quanto aos dados de vazão e nível de cursos d'água, esse órgão restringe-se ao fornecimento de relações cota-vazão de grandes rios e/ou os que apresentam potenciais econômicos, como aproveitamento hidroenergético ou transporte de bens e mercadorias (ANA, 2015; CLARKE & SILVA DIAS, 2002).

Para os córregos urbanos, são poucas as cidades que dispõem desses dados e, dentre estas, são raras as que possuem séries representativas (mais de 30 anos de medições). Para superar essas dificuldades, faz-se necessário estimar os hidrogramas de cheias através de modelos empíricos.

O ABC6 apresenta algumas opções de formulações empíricas e modelos para cálculo do tempo de concentração, da precipitação efetiva e geração do hidrograma sintéticos de cheia. Esses elementos serão descritos nos itens a seguir, apresentando as formulações presentes no software e seus limites de uso e aplicação, conforme sugestões da literatura técnica consultada no decorrer da pesquisa.

4.1.1 Fórmulas para cálculo do Tempo de Concentração (T_c)

A determinação do tempo de concentração, T_c , é indispensável para a concepção de projetos que envolvem modelagem hidrológica. Esse parâmetro temporal influencia na estimativa da vazão de pico e no formato do hidrograma sintético de cheia (FANG *et al.*, 2008; JÚNIOR & BOTELHO, 2011; SHARIFI & HOSSEINI, 2011).

Conceitua-se o tempo de concentração de duas formas. Em definição mais formal, entende-se como o intervalo temporal entre o centro de massa da precipitação efetiva e o ponto de inflexão do ramo de recessão do hidrograma. Pode-se simplificar o cálculo, considerando T_c

como a diferença temporal entre o fim da precipitação efetiva (caso não disponível, pode-se optar por utilizar o fim da precipitação) ao ponto supracitado. Em definição mais didática, entende-se como o tempo necessário para que uma gota d'água escoe do ponto hidráulicamente mais remoto até o exutório da bacia hidrográfica (MCCUEN, WONG & RAWLS, 1984).

Entretanto, devido à ausência de registros hidrometeorológicos e fluviométricos, diversas formulações foram propostas. Essas formulações têm por objetivo estimar esse parâmetro em função das características da área de estudo, como: área de drenagem, uso e ocupação do solo, declividade do talvegue ou da bacia hidrográfica, intensidade da precipitação e característica da rede de drenagem principal. Ressalta-se que essas formulações possuem caráter empírico e, portanto, são válidas para condições semelhantes às de sua determinação (PORTO, 1995; USDA, 1997). As fórmulas de determinação de T_c presentes no ABC6 são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Formulações de Tempo de Concentração presentes no ABC6.

Fórmula	Equação	Nº
Bransby - Willians	$T_c = 306 \cdot \frac{L_t}{5280} \cdot \left(\frac{1}{A^{0,1} \cdot S_t^{0,2}} \right)$	1
Dooge (1956)	$T_c = 70,8 \cdot \frac{A^{0,41}}{S_t^{0,17}}$	2
Kerby (1959)	$T_c = 7,23 \cdot \left(\frac{L_t \cdot r}{S_t^{0,5}} \right)^{0,467}$	3
Kirpich I (1940)	$T_c = 0,0196 \cdot \left(\frac{L_t^3}{\Delta h} \right)^{0,385}$	4
Kirpich II (1940)	$T_c = 0,28 \cdot \left(\frac{L_t^2}{S_t} \right)^{0,385}$	5
Onda Cinemática (1963)	$T_c = 55 \cdot \left(\frac{n^{0,6} \cdot L_t^{0,6}}{i^{0,4} \cdot S_t^{0,3}} \right)$	6
Soil Conservation Service - SCS (1975)	$T_c = 0,43 \cdot \frac{L_t^{0,8}}{S_b^{0,5}} \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}$	7
Equação Padrão ABC6	$T_c = \frac{\sqrt{A}}{2}$	8

Onde:

Δh – diferença de cotas, em m;

A – área da bacia, em km²;

c – rugosidade de retardo;

CN – número de deflúvio do modelo do SCS;

i – intensidade da precipitação, em mm/h;

L_t – comprimento do talvegue, em m;

n – rugosidade de Manning;

S_b – declividade equivalente da bacia, em m/km;

S_t – declividade equivalente do talvegue, em m/km.

A fórmula de Bransby-Willians (Equação 1) é recomendada para bacias rurais com área inferior a 250 km², onde o escoamento predominante seja em superfícies de, pelo menos, 1.000 metros de comprimento. É recomendada, também, em locais onde o coeficiente de escoamento superficial (razão entre a lâmina de precipitação efetiva e a precipitação total) seja maior que 0,4 (PILGRIM & CORDEVY, 1992).

A fórmula de Dooge (Equação 2) foi determinada com dados de 10 bacias rurais da Irlanda, com áreas variando de 140 a 930 km². Portanto, recomenda-se seu uso em bacias com áreas similares e com escoamento predominante em canais (PMSP, 2012).

A fórmula de Kerby (Equação 3) é recomendada para bacias hidrográficas, com área e declividade menor que, respectivamente, 0,04 km² (4 hectares) e 1%. Reflete o escoamento em superfícies com comprimento máximo de 370 metros. A rugosidade de retardo, coeficiente que se assemelha ao coeficiente de Manning, deve apresentar valor máximo de 0,8. Os valores recomendados desse coeficiente, para diversos tipos de uso do solo, encontram-se na Tabela 2 (TOMAZ, 2012; TxDOT, 2014).

Tabela 2 - Coeficiente de rugosidade da equação de Kerby em função do tipo de uso do solo.

Tipos de Uso do Solo	Rugosidade de retardo – r
Asfalto muito liso	0,007
Pavimento de piche e areia	0,0075
Concreto	0,012
Pavimento de piche e cascalho	0,017
Pavimentos	0,020
Gramma rigorosamente aparada	0,046
Solo compactado	0,100
Gramado ralo, campos cultivados e superfícies moderadamente rugosas	0,20 - 0,30
Pasto e gramados médios	0,40
Floresta decídua	0,60
Gramado denso	0,80
Gramado denso, Floresta de coníferas ou decíduas com camada profunda serrapilheira.	0,80

Fonte: Adaptado de Tomaz (2012) e TxDOT (2014).

A fórmula de Kirpich (Equações 4 e 5) foi desenvolvida com dados de 7 pequenas bacias rurais do Tennessee, com declividades variando entre 3 e 10% e área de drenagem com, no máximo, 0,5 km². Embora os dados de entrada (L_t , S_t e Δh) indiquem o escoamento em canais, o fato de ter sido desenvolvida para bacias muito pequenas, é uma indicação de que os parâmetros devem representar o escoamento superficial sobre o solo (SILVEIRA, 2005). Na tentativa de adaptar a formulação de Kirpich para áreas urbanas, Chow, Maidment e Mays (1988) recomendam que o valor do tempo de concentração seja multiplicado por 0,4, quando se tratar de escoamento predominante em superfícies asfálticas ou de concreto e 0,2 para canais de concreto. Outra consideração é o fato da fórmula subestimar o T_c quando L_t é superior a 10 km (PMSP, 2012).

A Equação 6 foi deduzida a partir da teoria da Onda Cinemática aplicada a superfícies, considerando as hipóteses de escoamento turbulento e precipitação de intensidade constante. Essa equação é adequada para bacias onde o método racional pode ser aplicado (áreas menores que 3 km²) e o escoamento em superfícies, com comprimento variando de 15 a 30 metros, seja predominante (FRANCO, 2004; PMSP, 2012).

A fórmula do Soil Conservation Service (SCS, Equação 7) foi desenvolvida a partir de dados de 24 bacias rurais, com áreas variando de 0,005 km² a 24 km². Essa formulação reflete o escoamento em superfícies. Deve-se, portanto, usar a declividade equivalente da área de drenagem e não a do talvegue (USDA, 1997).

Oliveira *et al.* (1999) ressaltam que a fórmula do SCS apenas apresenta resultados compatíveis com outras formulações para valores de CN próximos de 100 e comprimento de talvegue menor que 10 km. Essas características correspondem, geralmente, a bacias com área

de drenagem inferiores a 15 km². Essa fórmula caracteriza-se por superestimar o valor de T_c , comparando-a com as formulações de Kirpich, Dooge e para valores baixos de CN.

Por fim, quando são totalmente desconhecidas as características físicas da bacia hidrográfica, o ABC6 faz uso da equação 8 para uma estimativa inicial de T_c .

4.1.2 Modelos para determinação da Precipitação Efetiva

Precipitação efetiva, que origina o escoamento superficial direto (ESD), é a parcela da precipitação total que escoar pela superfície da bacia hidrográfica. Essa parcela concentra-se, inicialmente, em enxurradas e, posteriormente, em canais bem definidos. Esse processo ocorre após a iteração da precipitação com as características físicas da bacia hidrográfica e seus efeitos de perdas, como: interceptação vegetal, armazenamento em depressões, evapotranspiração e infiltração.

Oliveira (2012) define duas abordagens distintas para calcular o ESD. Na primeira, calcula-se por meio de modelos que levam em conta as características da bacia hidrográfica, como: tipo, uso e ocupação de solo e condições de umidade antecedente. Esses modelos baseiam-se, normalmente, em relações empíricas ou semiempíricas, sendo alguns de frágil fundamentação teórica. Entretanto, por serem de fácil uso e fornecerem resultados satisfatórios, quando empregados com discernimento, são largamente usados como, por exemplo, o modelo do SCS.

Na segunda abordagem, procura-se quantificar cada uma das diversas perdas inerentes ao processo. Entretanto, devido à infiltração ser o fenômeno mais representativo e de maneira a simplificar a rotina de cálculo, representa-se apenas essa parcela de perda. A principal dificuldade reside na determinação dos parâmetros das formulações, como nos modelos de Horton, Green-Ampt e Índice ϕ .

O ABC6 estima o ESD a partir dos 4 modelos supracitados, que serão descritos a seguir.

4.1.2.1 Modelo do SCS

Um dos modelos mais usados em estudos e projetos hidrológicos para determinação da precipitação efetiva é o modelo do SCS (*Soil Conservation Service*, atual *National Resources Conservation Service*), desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América. O modelo consiste na determinação do ESD através das seguintes equações:

$$P_{e(t)} = \frac{(P_{ac(t)} - I_a)^2}{P_{ac(t)} - I_a + ARM}, P_{ac(t)} > I_a \quad \text{Equação 9}$$

$$I_a = 0,2 \cdot \text{ARM} \quad \text{Equação 10}$$

$$\text{ARM} = \frac{25400}{\text{CN}} - 254 \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

$P_{e(t)}$ – precipitação efetiva, no instante t , em mm;

$P_{ac(t)}$ – precipitação total acumulada, no instante t , em mm;

I_a – perdas iniciais na bacia, em mm;

ARM – índice de armazenamento d'água no solo da bacia, em mm;

CN – número de deflúvio do modelo do SCS;

O índice ARM representa a máxima lâmina d'água que pode ser armazenada no solo, em um dado evento chuvoso. O índice I_a representa as perdas iniciais decorrentes da interação da precipitação com a bacia hidrográfica, originalmente, estimadas em 20% do ARM (PONCE & HAWKINS, 1996). Portanto, só haverá escoamento superficial se a precipitação total superar essas perdas, condição expressa na Equação 9.

O CN é o parâmetro que reflete as condições hidrológicas e de uso e ocupação do solo. É um valor adimensional, que pode variar entre 0 a 100. Elevados valores de CN indicam maior ESD. A partir do CN, é possível estimar o índice de armazenamento e, conseqüentemente, a precipitação efetiva. Para sua determinação, deve-se observar o tipo de solo, a sua ocupação e as condições de umidade do solo anteriores ao escoamento.

No modelo do SCS, os solos são reunidos em 4 grupos, conforme sua capacidade de infiltração e produção de escoamento. A cada grupo é atribuída uma letra: A, B, C ou D. Segundo Sartori, Genovez e Lombardi Neto (2005) e USDA (2004), os grupos são:

- Grupo A - solos com baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração quando completamente úmidos. Consistem, principalmente, de areias ou cascalhos, ambos profundos e excessivamente drenados. Sua composição típica é de menos de 10% de argila e mais de 90% de areia ou cascalho, apresentando a textura desses materiais. A taxa mínima de infiltração é maior que 7,62 mm/h;
- Grupo B - solos com moderada taxa de infiltração quando completamente úmidos. Consistem, principalmente, de solos moderadamente profundos a profundos, bem drenados, com textura variando de moderadamente fina a moderadamente grossa. Sua composição típica apresenta entre 10% a 20% de argila e 50% a 90% de areia. Enquadram-se nessa classificação solos que apresentam quantidade maior que 35% de fragmentos de rochas. A taxa mínima de infiltração encontra-se entre 3,81 e 7,62 mm/h;

- Grupo C - solos com alto potencial de escoamento, quando completamente úmidos. Apresentam textura moderadamente fina e camadas que dificultam a percolação. Sua composição típica é de 20% a 40% de argila e menos de 50% de areia. A taxa mínima de infiltração encontra-se entre 1,27 e 3,81 mm/h;
- Grupo D - solos que possuem alto potencial de escoamento e taxa de infiltração muito baixa, quando completamente úmidos. Caracterizam-se por serem solos argilosos com alto potencial de expansão, restringindo o movimento da água entre as camadas de solo. Pertencem a este grupo solos com grande permanência de lençol freático elevado, com argila dura, com camadas de argila próxima da superfície e solos expansivos agindo como materiais impermeabilizantes próximos da superfície. A taxa mínima de infiltração menor é que 1,27 mm/h.

Para as condições de umidade anteriores ao escoamento, o modelo apresenta 3 opções:

- Condição I – os solos apresentam-se secos e as precipitações acumuladas dos últimos 5 dias não ultrapassam 15 mm;
- Condição II – os solos apresentam-se em situação média na época de cheias. Nessa condição, as precipitações acumuladas dos últimos 5 dias totalizam entre 15 e 40 mm. Essa condição, normalmente, é utilizada para determinação de hidrogramas de projetos de drenagem urbana;
- Condição III – os solos apresentam-se úmidos com precipitações acumuladas dos últimos 5 dias maiores que 40 mm e condições meteorológicas que não favorecem a evaporação.

Os valores de CN para diferentes usos e ocupações do solo para a condição II estão presentes em tabelas no Anexo-1. Para converter os valores de CN para diferentes condições de umidade, Hawkins *et al.* (2008) apresentam a Equação 12 e Equação 13.

$$CN_I = \frac{CN}{2,281 - 0,01381 \cdot CN} \quad \text{Equação 12}$$

$$CN_{III} = \frac{CN}{0,427 + 0,00573 \cdot CN} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

CN_I – número de deflúvio do modelo do SCS para condição I;

CN_{III} – número de deflúvio do modelo do SCS para condição III.

O roteiro indicado para o cálculo do escoamento superficial pelo modelo do SCS consiste em: identificar os diferentes usos e ocupações do solo, por meio de mapas ou ferramenta SIG; determinar o valor de CN para cada uso e ocupação do solo e, conseqüentemente, o valor médio para a área de estudo; determinar a condição de umidade desejada e converter os valores de CN, caso necessário; e, por fim, determinar o ESD pelas equações propostas pelo modelo.

4.1.2.2 Modelo de Horton

Esse modelo assume que a capacidade de infiltração do solo segue um modelo exponencial de decaimento ao longo tempo, até atingir um patamar constante (Equação 14).

$$f_{(t)} = f_c + (f_o - f_c) \cdot e^{-k \cdot t} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

$f_{(t)}$ – taxa de infiltração no solo, no instante t , em mm/h;

f_c – taxa de infiltração mínima no solo, para $t = \infty$, em mm/h;

f_o – taxa de infiltração máxima no solo, para $t = 0$, em mm/h;

k – coeficiente de decaimento da infiltração, em horas⁻¹;

t - tempo decorrido, em horas.

Integrando-se a Equação 14, obtém-se a infiltração acumulada, ou potencial de infiltração, dado pela Equação 15.

$$F_{(t)} = f_c \cdot t + \frac{(f_o - f_c)}{k} \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

$F_{(t)}$ – infiltração acumulada no solo no instante t , em mm.

O modelo de Horton é aplicável, apenas, quando a intensidade da precipitação exceder a capacidade de infiltração do solo. Caso contrário, como, por exemplo, no início da precipitação, o modelo subestima a quantidade de água infiltrada (AKAN, 1993). Outra limitação é o fato do modelo não considerar a recuperação da capacidade de infiltração durante períodos secos (HAAN, 1994). Para superar essas limitações o SSD ABC6 faz uso do algoritmo de Berthelot, explicado detalhadamente em Tucci (2009).

Com relação aos parâmetros do modelo, Pitt, Lantrip e O'Connor (2000) sugerem que esses sejam determinados em trabalhos de campo ou por calibração, utilizando a maior quantidade de eventos possível. Caso não seja possível essa determinação, faz-se uso de valores

tabelados conforme a classificação hidrológica do tipo de solo segundo o SCS (Tabela 3) ou do tipo de solo (

Tabela 4 e Tabela 5)

Tabela 3 – Parâmetros da equação de Horton, segundo classificação hidrológica dos solos propostas pelo SCS.

Parâmetros	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
f_o	250	200	130	80
f_c	25	13	7	3
k	2	2	2	2

Fonte: Porto (1995).

Tabela 4 – Valores de taxa de infiltração mínima do solo em função do tipo de solo.

Tipo de Solo	f_c (mm/h)
Solo argiloso	0 - 1,27
Solo argilo-arenoso	1,27 - 3,81
Solo siltoso	3,81 - 7,62
Solo arenoso	7,62 - 11,43

Fonte: Akan (1993).

Tabela 5 – Valores de taxa de infiltração máxima do solo em função do tipo de solo.

Tipo de solo	f_o (mm/h)
Solo arenoso seco com pouca ou nenhuma vegetação	127,00
Solo argiloso seco com pouca ou nenhuma vegetação	76,20
Solo siltoso seco com pouca ou nenhuma vegetação	25,40
Solo arenoso seco com vegetação densa	254,00
Solo argiloso seco com vegetação densa	152,40
Solo siltoso seco com vegetação densa	50,00
Solo arenoso úmido com pouca ou nenhuma vegetação	43,18
Solo argiloso úmido com pouca ou nenhuma vegetação	25,40
Solo siltoso úmido com pouca ou nenhuma vegetação	7,620
Solo arenoso úmido com vegetação densa	83,20
Solo argiloso úmido com vegetação densa	50,80
Solo siltoso úmido com vegetação densa	17,78

Fonte: Akan (1993).

Com relação aos valores sugeridos, a Tabela 3 é indicada, também, pelo Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da cidade de São Paulo (SP) (PMSP, 2012). Quanto ao parâmetro k, de mais difícil determinação, sugere-se o valor de $4,14 \text{ horas}^{-1}$, quando não há dados disponíveis.

4.1.2.3 Modelo de Green-Ampt

Em 1911, Green e Ampt apresentaram uma equação para cálculo da infiltração acumulada (Equação 16), que vem sendo largamente utilizada até hoje.

$$F_{(t)} = K \cdot \Delta t + Z \cdot \ln\left(1 + \frac{Z}{F_{(t)}}\right) \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

$F_{(t)}$ – infiltração acumulada no solo no instante t , em mm;

K – condutividade hidráulica, em mm/h;

Δt – intervalo de discretização dos dados;

Z – sucção exercida pela camada superior do solo, em mm;

Segundo Chow, Maidment e Mays (1988), a resolução da Equação 16 é realizada por meio de cálculos iterativos, como, por exemplo, através do método de Newton devido a sua não linearidade. O parâmetro Z pode ser deduzido das equações que regem o fluxo de água nas camadas superiores do solo, mediante a introdução de algumas simplificações (Equação 17).

$$Z = (\theta_n - \theta_i) \cdot (H_f - H_o) \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

θ_n – água contida no solo nas condições naturais de saturação, expressa em fração de volume do solo;

θ_i – quantidade de água inicial do solo, expressa em fração de volume do solo;

H_f – sucção capilar exercida pelo solo, em mm;

H_o – altura da lâmina d'água depositada sobre o solo, em mm.

O valor de θ_n é limitado superiormente pela porosidade do solo e atinge, portanto, valores máximos da ordem de 0,4. Solos secos apresentam valores de umidade da ordem 0,1 e, dessa forma, o termo “ $\theta_n - \theta_i$ ” costuma variar de 0 a 0,3. O valor de H_o é, normalmente, pouco significativo em relação à H_f , sendo que valores médios desse parâmetro podem ser obtidos na literatura técnica (PMSP, 2012).

O ABC6, de forma a simplificar o cálculo da infiltração pelo modelo de Green-Ampt, correlaciona as variáveis K e Z (Equação 16) com os valores de CN, do modelo do SCS (Tabela 6). A faixa de valores de CN para correlação varia de 40 a 95. Frisa-se que caso os valores de CN inseridos estejam fora desse intervalo, o ABC6 não estima a infiltração.

Tabela 6 – Correspondência entre CN e os parâmetros de Green-Ampt.

CN	K (mm/h)	Z (mm)
95	0,28	11,20
90	0,28	22,40
85	0,28	33,60
80	0,28	44,90
75	0,29	54,90
70	0,79	40,50
65	1,34	35,80
60	2,17	29,10
55	3,17	25,00
50	4,25	22,20
45	5,43	20,30
40	6,64	18,90

Fonte: Adaptado de Porto (1995).

4.1.2.4 Modelo do Índice ϕ

Segundo Tucci (2009), o modelo do Índice ϕ é uma aproximação do modelo de Horton, quando t tende ao infinito e, conseqüentemente, $f_{(t)}$ tende a f_c . O modelo apresenta-se útil quando as variabilidades espacial e temporal dos parâmetros das fórmulas de infiltração as tornam de difícil aplicação. Essas variabilidades podem ocorrer, por exemplo, em grandes superfícies heterogêneas, sujeitas a intensidade de precipitação não uniforme. O cálculo da precipitação efetiva por esse modelo é dado pela Equação 18.

$$Pe_{(t)} = \sum_{i=1}^N (P_{(t)} - \phi \cdot t) \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

$Pe_{(t)}$ – precipitação efetiva, no instante t , em mm;

$P_{(t)}$ – precipitação total, no intervalo t , em mm;

ϕ – razão constante de infiltração, em mm/h;

4.1.3 Modelos de geração de Hidrogramas Sintéticos

Entende-se como hidrograma a representação gráfica da variação temporal da vazão numa determinada seção de controle (Figura 4). A vazão na seção é a soma dos diferentes tipos de escoamento – escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo – presentes na bacia hidrográfica. Dentre esses, o ESD é o mais representativo em projetos de drenagem urbana.

Figura 4- Parâmetros de um hidrograma de ESD. Fonte: Adaptado de Silveira (2010).

Onde:

d – duração da precipitação efetiva;

T_A – tempo de ascensão (intervalo temporal entre o início da precipitação e o pico do hidrograma);

T_b – tempo de base (intervalo temporal para que o curso d'água volte às condições anteriores ao ESD);

T_c – tempo de concentração;

T_R – tempo de retardo (intervalo temporal entre o centro de massa do hidrograma efetivo e o centro de gravidade do hidrograma).

A Figura 4 representa um hidrograma gerado por um bloco único de precipitação efetiva, com duração d e intensidade constante. O T_c representa o instante em que a contribuição do local mais distante da bacia passa pela seção de controle, ou seja, toda bacia já contribuiu com o ESD. A partir do ponto de inflexão, passará pela seção, somente, a água que estava temporariamente armazenada em superfícies e canais (TUCCI, 2009; SILVEIRA, 2010).

Uma das maneiras para estimar o hidrograma resultante de uma bacia é por meio da teoria do Hidrograma Unitário (HU). O HU representa o hidrograma de ESD correspondente à precipitação efetiva unitária, de intensidade constante e uniformemente distribuída, sobre a área de drenagem. Entende-se o HU como um modelo linear concentrado simples, utilizado como função de transferência, para gerar hidrogramas de cheias correspondentes a precipitações efetivas, de quaisquer magnitudes e durações (PINHEIRO, 2011). As suposições intrínsecas do modelo do HU, listados por Chow, Maidment e Mays (1988), são:

- A precipitação efetiva tem intensidade constante durante sua duração;
- A precipitação efetiva é uniformemente distribuída sobre toda a área de drenagem;

- O tempo de base do HU resultante de uma precipitação efetiva de dada duração é constante;
- As ordenadas do escoamento superficial de mesma duração, em tempos correspondentes, são diretamente proporcionais ao volume total escoado representado por cada hidrograma;
- Para uma determinada bacia, o hidrograma resultante de uma dada precipitação efetiva reflete as características permanentes da bacia.

O HU é determinado para bacias com disponibilidade de dados históricos, a partir das equações de convoluções. Para regiões onde não há essa disponibilidade, faz-se uso de modelos para estimar o hidrograma sintético, a partir dos parâmetros relacionados com as características físicas da bacia. O ABC6 apresenta 3 modelos de geração de hidrogramas sintéticos que serão descritos a seguir.

4.1.3.1 Modelo do Hidrograma Triangular do SCS

O Modelo do Hidrograma Triangular do SCS considera que o hidrograma de ESD seja igual à forma de um triângulo (Figura 5).

Figura 5- Hidrograma triangular do SCS. Fonte: Adaptado de Silveira (2010).

A forma da Figura 5 representa uma média de um grande número de HU's de bacias hidrográficas dos EUA, que obedecem às seguintes relações:

$$T_b = 2,67 \cdot T_p \quad \text{Equação 19}$$

$$T_p = T_R + d/2 \quad \text{Equação 20}$$

$$T_R = 0,6 \cdot T_c \quad \text{Equação 21}$$

$$Q_p = 0,208 \cdot \frac{A}{T_p} \cdot ESD_{unit}$$

Equação 22

Onde:

A – área da bacia, em km²;

d – duração da precipitação efetiva, em horas;

Q_p – vazão de pico, em m³/s;

ESD_{unit} – escoamento superficial direto unitário, em mm;

T_b – tempo de base, em horas;

T_c – tempo de concentração, em horas;

T_p – tempo de pico, em horas;

T_R – tempo de retardo, em horas;

O modelo admite que a cada passo temporal, cada parcela de ESD gera um hidrograma triangular. Como precipitações observadas podem ser divididas em vários blocos de precipitação, o hidrograma final de projeto corresponde à soma de cada hidrograma triangular parcial. Essa consideração faz válidos os princípios do HU, apresentados anteriormente.

Apesar de fácil aplicação, o modelo apresenta como desvantagem o fato de não levar em conta os fenômenos de translação e amortecimento da bacia hidrográfica. Porto (1995) conceitua translação como o movimento da água ao longo dos canais. O tempo de translação, portanto, é o tempo que uma partícula de água leva para percorrer uma determinada distância. O amortecimento representa a parcela de ESD que fica, temporariamente, retido na bacia e chegará, com certo atraso, à seção de controle.

4.1.3.2 Modelo de Clark

O Modelo de Clark caracteriza-se por incorporar os processos de translação e amortecimento da bacia hidrográfica no hidrograma resultante.

O processo de translação é representado através do conceito de histograma tempo-área (Figura 6). Este conceito expressa a fração da bacia que contribui com o escoamento na seção de controle, em função do tempo. O histograma tempo-área, portanto, consiste em dividir a área da bacia em subáreas, que apresentem o mesmo tempo de translação até a seção de controle, por meio de linhas imaginárias denominadas linhas isócronas (SABOL, 1988; STRAUB, MELCHING & KOCHER, 2000).

Figura 6 - Isócronas e histograma tempo-área. Fonte: Silveira (2010).

No ABC6, a construção do histograma tempo-área é feita pelo seguinte algoritmo:

1. Inserir os parâmetros: fator de forma do modelo de Clark¹, n_f ; T_c ; intervalo de discretização dos cálculos (Δt); e área da bacia;
2. Verificar se n_f está entre 1 e 2. O fator de forma é o parâmetro que busca representar a forma da bacia hidrográfica, variando de 1 a 2, com valor padrão de 1,5. O valor 1 representa bacias retangulares e o valor 2, bacias hexagonais;
3. Calcular o número de passos temporais necessários (Equação 23);

$$N_{pt} \text{ (Número de passos temporais)} = \frac{T_c}{\Delta t} \quad \text{Equação 23}$$

4. Para cada passo temporal t , determinar a área acumulada da bacia (A_{ac}) que está contribuindo com o escoamento (Equação 24);

$$A_{ac(t)} = \begin{cases} A \cdot \left(\frac{t}{N_{pt}} \right)^{n_f}, & t/N_{pt} \leq 0,5 \\ 1 - A \cdot \left(1 - \frac{t}{N_{pt}} \right)^{n_f}, & t/N_{pt} > 0,5 \end{cases} \quad \text{Equação 24}$$

5. Para cada passo temporal t , determinar a subárea delimitada pelas linhas isócronas (Equação 25).

$$A_{iso(t)} = \begin{cases} A_{ac(t)}, & t = 1 \\ A_{ac(t)} - A_{ac(t-1)}, & 1 < t \leq N_{pt} \end{cases} \quad \text{Equação 25}$$

¹ Esse parâmetro não corresponde ao fator de forma da bacia hidrográfica, presente em livros de hidrologia. Em conversa com o Eng. Cristiano de Pádua Oliveira Milagres, principal responsável do ABC6, foi dito que esse parâmetro representa a bacia hidrográfica da seguinte forma: valores próximos a 1 indicam bacias retangulares e próximos a 2, bacias hexagonais.

O hidrograma instantâneo da bacia é gerado multiplicando-se lâmina de precipitação efetiva pela subárea delimitada pelas isócronas correspondentes. Ressalta-se que o histograma é limitado pelo T_c da bacia, visto que nesse passo temporal toda a bacia contribui para o ESD.

O processo de amortecimento é representado pela propagação do hidrograma instantâneo através de um reservatório linear, cuja constante de propagação é denominada de constante de propagação do modelo de Clark, K_{Cl} . O grau de amortecimento do ESD na bacia e K_{Cl} apresentam relação direta, ou seja, maiores valores de K_{Cl} acarretam um maior amortecimento do hidrograma instantâneo de ESD (SABOL, 1988).

O hidrograma instantâneo, as equações da continuidade e a relação de armazenamento são dadas, respectivamente, pela Equação 26, Equação 27 e Equação 28:

$$I_{(t)} = 1.000 \frac{P_{e(t)} \cdot A_{iso}}{\Delta t} \quad \text{Equação 26}$$

$$\frac{dV_{(t)}}{dt} = I_{(t)} - Q_{(t)} \quad \text{Equação 27}$$

$$V_{(t)} = 3.600(K_{Cl} \cdot Q_{(t)}) \quad \text{Equação 28}$$

Onde:

$I_{(t)}$ – hidrograma instantâneo, no instante t , em m^3/s ;

$P_{e(t)}$ – precipitação efetiva, no instante t , em mm ;

$A_{iso(t)}$ – área da bacia delimitada pelas linhas isócronas, no instante t , em km^2 ;

$V_{(t)}$ – volume armazenado temporariamente, no instante t , em m^3 ;

$Q_{(t)}$ – vazão no exutório, no instante t , em m^3/s ;

K_{Cl} – constante de propagação do modelo de Clark, em horas.

Desenvolvendo as equações Equação 27 e Equação 28, para os instantes t e $t-\Delta t$, tem-se:

$$Q_{(t)} = Q_{(t-\Delta t)} + C \cdot [I_{(t-\Delta t)} + I_{(t)} - 2Q_{(t-\Delta t)}] \quad \text{Equação 29}$$

$$C = \frac{\Delta t}{\Delta t + 2 \cdot K_{Cl}}$$

Onde:

$I_{(t-\Delta t)}$ – hidrograma instantâneo, no instante $t-\Delta t$, em m^3/s ;

$Q_{(t-\Delta t)}$ – vazão no exutório, no instante $t-\Delta t$, em m^3/s ;

C – coeficiente de amortecimento do reservatório linear, em função de K_{Cl} ;

Δt – intervalo de discretização dos cálculos;

No ABC6, a constante K_{Cl} pode ser determinada por meio de 2 equações empíricas: Dooge (Equação 30) e Sabol (Equação 31).

$$K_{Cl} = 16,1 \cdot \left(\frac{A^{0,23}}{S_t^{0,70}} \right) \quad \text{Equação 30}$$

$$K_{Cl} = T_c \cdot \left[1,46 - 867 \cdot 10^{-10} \cdot \left(\frac{L_t^2}{A} \right) \right]^{-1} \quad \text{Equação 31}$$

Onde:

A – área da bacia, em km^2 ;

L_t – comprimento do talvegue, em m;

S_t – declividade do talvegue, em m/km;

T_c – tempo de concentração, em horas;

A Equação 30 é a relação encontrada por O’Kelly, citada por Dooge (1973), para 10 bacias hidrográficas da Irlanda, com área variando entre 145 a 948 km^2 e declividades entre 1 a 5% (10 a 50 m/km).

A Equação 31 é a relação encontrada por Sabol (1988) durante estudo de inundações causadas por uma barragem no oeste do Colorado, EUA. A relação foi encontrada a partir da análise dos registros de nível d’água de 12 pontos da bacia hidrográfica e áreas adjacentes.

4.1.3.3 Modelo de Santa Bárbara

O modelo de Santa Bárbara foi desenvolvido a partir dos dados de precipitação e vazão do condado de Santa Bárbara, na Califórnia. Esse pode ser considerado uma simplificação do modelo de Clark, visto que consiste em propagar o hidrograma instantâneo por um reservatório linear imaginário de apenas uma isócrona, cuja constante de propagação é proporcional ao T_c da bacia.

Essa simplificação, entretanto, não permite ao ESD uma defasagem no tempo, em função da distância e do tempo de translação. Portanto, o modelo de Clark é mais representativo quanto ao comportamento do ESD, em relação ao modelo de Santa Bárbara.

Segundo Oliveira (2012), o modelo admite que o hidrograma instantâneo de entrada seja representado pelo ESD, multiplicado pela área da bacia e dividido pelo intervalo de tempo de discretização dos dados (Equação 32).

$$I_{(t)} = 1.000 \frac{P_{e(t)} \cdot A}{\Delta t} \quad \text{Equação 32}$$

Onde:

$I_{(t)}$ – hidrograma instantâneo, no instante t , em m^3/s ;

$P_{e(t)}$ – precipitação efetiva, no instante t , em mm ;

A – área da bacia, em km^2 ;

Δt – intervalo de discretização dos cálculos;

Desenvolvendo a Equação 32, semelhante ao modelo de Clark, obtém-se:

$$Q_{(t)} = Q_{(t-\Delta t)} + K_{sb}[I_{(t-\Delta t)} + I_{(t)} - 2Q_{(t-\Delta t)}] \quad \text{Equação 33}$$

$$K_{sb} = \frac{\Delta t}{\Delta t + 2 \cdot T_c} \quad \text{Equação 34}$$

Onde:

$Q_{(t)}$ – vazão no exutório, no instante t , em m^3/s ;

$Q_{(t-\Delta t)}$ – vazão no exutório, no instante $t-\Delta t$, em m^3/s ;

K_{SB} – constante de propagação do modelo de Santa Bárbara;

$I_{(t-\Delta t)}$ – hidrograma instantâneo, no instante $t-\Delta t$, em m^3/s ;

Δt – intervalo de discretização dos cálculos;

T_c – tempo de concentração.

Tsihrintzis e Sidan (1998) afirmam que o T_c deve ser cuidadosamente determinado. Este cuidado provém de sua influência direta em K_{SB} (Equação 34), que, por sua vez, afeta o formato e o pico do hidrograma resultante (Equação 33). Os autores recomendam, também, adotar o intervalo de discretização Δt igual, ou inferior, a um quinto do T_c .

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item, apresenta-se a metodologia empregada para a realização da pesquisa.

Inicialmente, descreve-se a área de estudo, apresentando informações pertinentes à bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho e de suas características cartográficas. Para essa etapa do trabalho, foram utilizados os softwares de geoprocessamento (ArcGis 10.0) e de desenho técnico (AutoCad 2015).

A seguir, descreve-se a rede de monitoramento hidrológico utilizada na pesquisa, apresentando as peculiaridades de seus componentes, os critérios de seleção dos eventos chuva-vazão e os hietogramas e hidrogramas observados.

Por fim, descreve-se como foi realizada a estimativa dos parâmetros dos modelos hidrológicos presentes no ABC6 para a bacia do Mineirinho, sendo:

1. Análise crítica das fórmulas de tempo de concentração presentes no ABC6 e aplicação da equação mais apropriada à área de estudo. Os resultados obtidos são apresentados nesse item devido ao uso do parâmetro temporal na estimativa dos elementos hidrológicos restantes;
2. Estimativa dos parâmetros dos modelos de determinação de precipitação efetiva e metodologia de avaliação de desempenho;
3. Estimativa dos parâmetros dos modelos de geração de hidrogramas sintéticos e metodologia de avaliação de desempenho.

Nessa fase, usou-se o ABC6 como ferramenta de cálculo e o software Microsoft Excel 2010 para manipulação e organização dos resultados obtidos.

Ressalta-se que as licenças dos softwares ArcGis 10.0 e Microsoft Excel 2010 encontram-se disponíveis na instituição. Foi utilizada a versão estudantil do software Autocad 2015, disponível para download, gratuitamente, no seguinte endereço eletrônico <http://www.autodesk.com/education/free-software/autocad> (acesso em 18 de novembro de 2014).

5.1 Área de estudo

A área de estudo escolhida para a pesquisa foi a bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho (Figura 7), localizada na cidade de São Carlos (SP). A bacia apresenta área de 5,85 km² e perímetro igual a 10,85 km, com diferença entre a cota mais baixa (780 m) e mais alta (872 m) de 92 m. Segundo Tolentino (2007), a temperatura média do mês mais quente é de cerca de 23°C e a do mês mais frio, 18°C, com precipitação média anual de 1521 mm.

A bacia possui 3 corpos d'água: o corpo principal, que nasce no bairro Santa Angelina, com aproximadamente 3,84 km de extensão; um afluente na margem direita, que nasce no interior da área 2 do campus da USP de São Carlos, com 729 m; e um afluente na margem esquerda, que também nasce no bairro Santa Angelina, com 706 m. O comprimento total dos canais é de 5,3 km (BENINI, 2005).

Em relação à pedologia, os solos são, predominantemente, latossolos vermelho-amarelo, profundos e distróficos (solos com característica ácida e de baixa fertilidade natural) nos interflúvios (BENINI, 2005). Esse tipo de solo apresenta-se, segundo a análise granulométrica realizada por Almeida (2009), extremamente arenoso, conferindo-lhe boa drenagem interna, baixa erodibilidade e baixo potencial de geração de ESD. Entretanto, quando submetido a um grande volume de escoamento, pode desenvolver ravinas profundas e, se interceptado o lençol freático, voçorocas. Devido a essas características, os latossolos vermelho-amarelo enquadram-se nos solos pertencentes ao grupo hidrológico tipo B, segundo a classificação proposta pelo SCS (PMSC, 2011; SARTORI, GENOVEZ & LOMBARDI NETO, 2005).

A bacia encontra-se em processo de urbanização, o que a torna interessante para o desenvolvimento de estudos de planejamento urbano. Resumidamente, a bacia do Mineirinho começou a ser urbanizada de forma lenta, desde o lançamento dos primeiros residenciais habitacionais na década de 1970. O processo de ocupação intensificou-se entre as décadas de 1990 e 2010, principalmente após a instalação de: 2 condomínios de alto padrão, o Parque Faber I em 1991 e o Parque Faber II em 2003; um Shopping Center, em 1996; e a área 2 do campus da USP de São Carlos, em 2005. Atualmente, a área é ocupada por residenciais populares, condomínios de alto padrão, um shopping center, um campus universitário, pastagens, áreas de reflorestamentos, áreas cultivadas e terrenos baldios (APRÍGIO, 2012).

Figura 7 – Localização geográfica da bacia do córrego do Mineirinho. Fonte: Angelini Sobrinha *et al.* (2014).

5.1.1 Determinação de parâmetros fisiográficos das sub-bacias do Mineirinho

Para melhor representar no ABC6 a área de estudo e suas peculiaridades, a bacia do Mineirinho foi dividida em 5 sub-bacias (Figura 8), conforme divisão sugerida por Aprígio (2012).

Figura 8 - Sub-bacias da bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho. Fonte: Aprígio (2012).

Para a determinação dos parâmetros fisiográficos das subáreas, foi utilizada a base cartográfica da cidade de São Carlos (SP), disponível, gratuitamente, no Centro de Divulgação Científica e Cultural (CDCC) da USP de São Carlos (SP). Esse banco de dados é composto por mapas digitalizados, em formato CAD (*Computer Aided Design*). Os mapas apresentam curvas de nível de 5 em 5 m, arruamento, nome dos bairros, hidrografia dos canais principais, linha de cumeada e pontos cotados para a maioria das bacias urbanas do município.

A partir desse banco de dados e utilizando o software ArcGis 10.0, extraiu-se a área de cada sub-bacia, o comprimento do percurso hidráulico e sua respectiva declividade. O termo percurso hidráulico refere-se ao conceito de talvegue, apresentado no Glossário de Termos

Hidrológicos (ANA, 2001) definido como: a linha que segue a parte mais baixa de um vale, sendo seu comprimento determinado a partir do traçado do sentido do escoamento da água, dos pontos mais altos e mais distantes até seu respectivo exutório.

A declividade de cada percurso hidráulico foi obtida por meio da média harmônica (Equação 35), também denominada de declividade equivalente. Os valores de área e percurso hidráulico, assim como as respectivas declividades, encontram-se na Tabela 7.

$$S_{eq} = \left[\frac{L}{\sum_{i=1}^{n_{trechos}} \frac{L_i}{\sqrt{S_i}}} \right]^2 \quad \text{Equação 35}$$

Onde:

S_{eq} – declividade equivalente, em m/m;

L – extensão total do percurso hidráulico/talvegue, em m;

L_i – extensão horizontal do trecho considerado, em m;

$n_{trechos}$ – número de trechos retilíneos considerado;

S_i – declividade média em cada trecho, em m/m, sendo o quociente entre a diferença de cotas (Δh) no trecho e sua respectiva extensão.

Tabela 7 – Parâmetros fisiográficos da bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho.

Bacia	Área (km ²)	S_b (m/km)	Percurso Hidráulico	
			L_t (m)	S_t (m/km)
SB1	1,41	41,21	2.344,78	14,69
SB2	0,84	41,38	1.190,49	28,50
SB3	0,39	42,62	428,17	9,34
SB4	0,84	33,66	1.408,33	24,10
SB5	2,37	56,77	2.175,67	18,39
Bacia do Mineirinho	5,85	17,39	4.948,14	14,60

5.2 Rede de monitoramento hidrológico

Para a coleta de dados hidrológicos referentes aos eventos chuva-vazão na bacia do Mineirinho, foi utilizada a rede de monitoramento hidrológico do Laboratório de Simulação Numérica (LabSin), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC – USP), que corresponde a 4 estações de monitoramento pluviométrico e uma estação fluviométrica (Figura 9). A Tabela 8 apresenta uma descrição sucinta dos pontos da rede de monitoramento hidrológico da EESC-USP.

Figura 9 - Rede de monitoramento hidrológico da bacia do córrego do Mineirinho.

Tabela 8 – Descrição dos pontos da rede de monitoramento hidrológico da EESC-USP.

Ponto	Descrição
Electrolux	Pluviógrafo instalado nas dependências da Fábrica da Electrolux de São Carlos (SP)
EBSC	Pluviógrafo instalado nas dependências da Escola Municipal Bento da Silva César
PSSF	Pluviógrafo instalado nas dependências do Posto de Saúde da Família do Jardim Santa Felícia
USP Área II	Pluviógrafo instalado nas dependências da Área II do Campus da USP de São Carlos (SP)
Estação Fluviométrica	Sonda acústica instalada no trecho canalizado da rotatória da Avenida Bruno Ruggiero Filho

A rede de monitoramento pluviométrico compreende 4 pluviógrafos de báscula, sendo 3 instalados dentro da área da bacia. Os pluviógrafos apresentam resolução de 0,2 mm, com registro automático, em datalogger, do instante em que a resolução é atingida. A distribuição

espacial da precipitação foi considerada através da geração de hietogramas médios, determinados pelo método dos polígonos de Thiessen. Ressalta-se, porém, que durante a operação dessa rede, alguns pluviógrafos apresentaram defeitos e, portanto, a área de influência de cada pluviógrafo diferiu a cada evento chuvoso.

A estação fluviométrica, responsável pela aquisição dos dados de vazão e nível d'água, foi instalada próxima ao exutório da bacia. Foi realizado um estudo prévio dos possíveis locais de instalação e do equipamento de medição apropriado a ser utilizado. Nesse estudo, contemplaram-se as seguintes recomendações práticas, presentes no “*Water Measurement Manual*” (USDI, 2001), referentes à:

- Local de instalação – deve ser de fácil acesso para instalação, manutenção e operação; sem a presença de fenômenos hidráulicos, que possam vir a interferir as medições, como remanso ou ressalto hidráulico; e seguro para o instrumento de medição e possíveis operadores;
- Instrumento de Medição – deve ser fácil de instalar, calibrar e adaptável a diferentes condições de operação; capaz de medir variações de vazão em tempo hábil; resistente a impactos de sedimentos grosseiros; e de custo razoável.

Após a comparação de diversos locais possíveis de instalação, foi escolhido o trecho canalizado da rotatória da Avenida Bruno Ruggiero Filho, próximo ao exutório da bacia, que apresenta seção transversal retangular estável fechada (Figura 10), com largura e altura de 2,5 m e comprimento de 32 m.

Figura 10 - Entrada do trecho canalizado do córrego do Mineirinho localizado na Avenida Bruno Ruggiero Filho.

O instrumento de coleta dos dados de vazão e nível d'água escolhido foi uma sonda acústica do tipo ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), instalada no centro da galeria a, aproximadamente, 16m a jusante de sua entrada (Figura 11). Para protegê-la de impactos, foi instalada uma grade de proteção a uma distância de um 1 m à montante do instrumento. Essa distância foi calculada de forma a não intervir no processo de medição (interferências no pulso acústico emitido) e nas condições de fluxo, evitando o acúmulo de sedimentos sobre a sonda.

Figura 11 - Detalhe da grade de proteção e da sonda acústica, instalados no fundo do trecho canalizado do córrego do Mineirinho.

A sonda foi configurada para coleta de dados automatizada de 2 em 2 minutos e, portanto, os hietogramas e os cálculos a serem realizados no ABC6 também apresentam essa discretização temporal.

5.2.1 Eventos Seleccionados

A aquisição de eventos chuva-vazão se deu nos anos hidrológicos de 2013/2014 e 2014/2015, caracterizados como anos atípicos devido à baixa precipitação, durante suas estações chuvosas. O processo de seleção de eventos para a simulação pautou-se nos seguintes critérios:

- A vazão de pico observada deve ser maior que $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$;
- A sonda acústica apresenta sistema que indica erros durante o processo de medição dos dados de vazão e nível. Dessa forma, os dados coletados não devem apresentar erros apontados pelo instrumento.

Seguindo estes critérios, foram selecionados 12 eventos chuva-vazão cujas principais informações estão na Tabela 9, sendo:

- 1ª e 2ª coluna – indicam, respectivamente, a enumeração dos eventos coletados e a data de sua ocorrência;
- 3ª a 8ª coluna – indicam os dados de precipitação do evento, respectivamente: intensidade da precipitação; duração da precipitação; precipitação total; volume total precipitado; precipitação acumulada nos últimos 5 dias; e a condição de umidade anterior ao escoamento (CAE), segundo o modelo de determinação de precipitação efetiva do SCS;
- 9ª a 12ª coluna – indicam as informações sobre o hidrograma observado, respectivamente: vazão de pico, tempo de pico, tempo de base e o volume de escoamento superficial direto (ESD);
- 13ª coluna – indica quais pluviógrafos estavam funcionando no evento e suas respectivas áreas de influência, conforme a Tabela 10. No Apêndice B, a Figura 25, Figura 26 e Figura 27 ilustram, respectivamente, as situações 1, 2 e 3.

Os 12 hieto-hidrogramas observados em campo encontram-se no Apêndice A, da Figura 13 a Figura 24.

Tabela 9 - Resumo dos eventos de chuva e vazão coletados pela rede de monitoramento hidrológico.

Evento	Data (dd/mm/aaaa)	Hietograma						Hidrograma				Situação
		Intensidade da Precipitação (mm/h)	Duração da Precipitação (minutos)	Precipitação Total (mm)	Volume Total Precipitado (m³)	Precipitação Acumulada (mm)	CAE	Vazão de Pico (m³/s)	Tempo de Pico (minutos)	Tempo de Base (minutos)	ESD (m³)	
1	12/03/2014	10,65	48	8,52	49.832	34,08	II	2,45	56	228	12.438	Situação 1
2	31/03/2014	19,83	44	14,54	85.078	6,66	I	4,43	42	180	15.682	Situação 3
3	08/11/2014	14,56	186	45,13	264.030	87,20	III	5,74	54	400	42.511	Situação 2
4	11/12/2014	12,58	72	15,09	88.300	24,97	II	2,92	48	220	11.819	Situação 3
5	12/12/2014	26,57	28	12,40	72.540	38,70	II	3,38	22	248	15.123	Situação 3
6	14/12/2014	33,97	26	14,72	86.110	108,92	III	2,95	28	206	11.393	Situação 3
7	22/12/2014	19,28	60	19,28	112.762	24,40	II	6,62	62	388	35.334	Situação 3
8	21/01/2015	17,22	40	11,48	67.148	12,01	I	2,71	22	176	8.970	Situação 3
9	29/01/2015	14,19	30	7,09	41.502	29,43	II	1,73	50	184	6.126	Situação 3
10	31/01/2015	19,14	34	10,85	63.446	32,74	II	2,90	52	198	9.928	Situação 3
11	01/02/2015	8,55	100	14,25	83.363	19,90	II	3,63	60	240	13.494	Situação 3
12	25/02/2015	42,71	56	39,87	233.222	33,16	II	12,46	66	238	49.925	Situação 3

Tabela 10 - Área de influência dos pluviógrafos segundo o Método de Thiessen para cada situação.

Situação	Área de Influência (km²)			
	Electrolux	EBSC	PSSF	USP2
1	0,51	0,99	2,06	2,29
2	-	1,03	-	4,82
3	-	0,99	2,57	2,29

5.3 Estimativa dos parâmetros hidrológicos da bacia do Mineirinho para simulação no ABC6

Nesse item, descreve-se como foram estimados os parâmetros hidrológicos da bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho. Primeiro, estimou-se o T_c . Depois, os parâmetros dos modelos de determinação de precipitação efetiva e de geração de hidrogramas sintéticos.

5.3.1 Estimativa do Tempo de Concentração

Conforme definido no item 4.1.1, entende-se T_c como o intervalo temporal entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do trecho de recessão do hidrograma observado. Para a determinação desse ponto, a metodologia padrão, segundo Tucci (2009), consiste em aplicar a transformação logarítmica no eixo das vazões e determinar o instante temporal, localizado na recessão do hidrograma, onde há mudança de tendência na reta de vazões transformadas.

A partir das informações das formulações de T_c (item 4.1.1), foi elaborada a Tabela 11, que resume as condições necessárias para aplicação de cada fórmula presente no ABC6.

Tabela 11 - Resumo dos dados de entrada necessários para aplicação das formulações de T_c , do ABC6.

Fórmula	Tipo (Rural/Urbana)	Área (km ²)	Declividade (%)	Talvegue (m)	Tipo de escoamento predominante
Bransby - Willians	R	≤ 250	-	≥ 1.000	Superfícies
Dooge	R	140 – 930	-	-	Canais
Kerby	U/R	$\leq 0,04$	≤ 1	≤ 370	Superfícies
Kirpich	R	$\leq 0,5$	3 – 10	-	Superfícies
Onda Cinemática	U/R	≤ 3	-	15 -30	Superfícies
SCS	R	0,05 – 24	-	≤ 10.000	Superfícies

Pela análise da Tabela 7 e Tabela 11, pode-se observar que:

- Bransby-Willians – não atende aos critérios Tipo (Rural/Urbana), Talvegue e Tipo de escoamento predominante;
- Dooge – não atende aos critérios Tipo (Rural/Urbana) e Área;
- Kerby – não atende aos critérios Área, Declividade, Talvegue e Tipo de escoamento predominante;
- Kirpich – não atende aos critérios Tipo (Rural/Urbana), Área e Tipo de escoamento predominante;
- Onda Cinemática - não atende aos critérios Talvegue e Tipo de escoamento predominante;
- SCS – não atende aos critérios Tipo (Rural/Urbana) e Tipo de escoamento predominante;

Conclui-se, inicialmente, que nenhuma das formulações, presentes no ABC6, mostra-se apta a estimar o T_c nas sub-bacias da área de estudo.

Silveira (2005), ao avaliar o desempenho de fórmulas de determinação de T_c , permitiu ampliar os limites de uso e aplicação das seguintes fórmulas: Dooge, Kerby, Kirpich, Onda Cinemática e SCS. A metodologia de avaliação de desempenho consistiu em analisar o erro médio percentual e o erro padrão, visando avaliar, respectivamente, a precisão e a acurácia de cada formulação. O critério aderido classificou como adequada as formulações de T_c em que o erro médio percentual fosse, em pelo menos mais da metade das simulações, menor ou igual, em valores absolutos, a 30%. Os resultados obtidos pelo autor encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 - Erros das fórmulas de T_c .

Fórmula	N	Área (km ²)	EM (%)	EP (%)
Dooge	12	0,002 - 0,04	-32	17
Kerby	26	0,001 - 0,62	-7	32
Kirpich	16	0,04 - 26,2	1	39
Onda Cinemática	18	0,002 - 0,05	34	52
SCS	6	0,005 - 0,03	15	34

Fonte: Adaptado de Silveira (2005).

Pela análise da Tabela 7 e Tabela 12, verificou-se que apenas a formulação de Kirpich atende aos critérios de área de aplicação para as sub-bacias do Mineirinho e de EM sugerido por Silveira (2005). Portanto, escolheu-se essa fórmula para estimar o T_c da bacia em estudo. Outro fator que corrobora com essa escolha é que essa formulação já foi utilizada, em pesquisas anteriores, para estimar o T_c da área de estudo, como, por exemplo, em Benini (2005), Aprígio (2012), Pontremolez (2013) e Paulino (2014).

O resultado da aplicação da fórmula de Kirpich (equações 4 e 5), para a bacia do Mineirinho e suas sub-bacias, encontra-se na Tabela 13.

Tabela 13 – T_c calculados a partir da formulação de Kirpich para a bacia do Mineirinho.

Bacia	Tempo de Concentração (minutos)
SB1	39
SB2	18
SB3	13
SB4	22
SB5	34
Bacia do Mineirinho	70

5.3.2 Parâmetros de cálculo de Precipitação Efetiva

Nesse item, descreve-se como foram estimados os parâmetros dos modelos de determinação de precipitação efetiva presentes no ABC6, a saber:

- Os valores de CN para o modelo do SCS de cada sub-bacia da bacia do Mineirinho;
- Os valores dos parâmetros do modelo de Horton, sendo propostos 2 conjuntos de aplicação: o primeiro, em função do grupo hidrológico do solo; e o segundo, em função do tipo e vegetação presente no solo;
- Os valores dos parâmetros do modelo de Green-Ampt em função dos valores de CN estimados, por meio da correlação automática realizada pelo ABC6;
- Os valores do Índice ϕ .

5.3.2.1 Estimativa do valor de CN

Para estimativa dos valores de CN, foi utilizado o mapa de uso e ocupação do solo da bacia do Mineirinho (Figura 12), desenvolvido por Paulino (2014), correspondente às condições próximas às atuais.

Esse mapa foi gerado pela aplicação da técnica de classificação de imagens de satélite denominada “análise orientada a objetos” em uma imagem de alta resolução. Esta é um produto do satélite Worldview-II da companhia DigitalGlobe, registrada em 02 de junho de 2011, com ângulo off-nadir 22,2° e resolução radiométrica de 11 bits. O sensor tem elevada resolução e dispõe de 8 bandas espectrais, da faixa do azul até o infravermelho próximo. Entre as bandas espectrais estão: a pancromática, com resolução espacial de 0,5 m; e as bandas multiespectrais azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, com resolução espacial de 2 m. Estes canais trabalham, respectivamente, nas faixas espectrais: 447 - 808 nm, 442 - 515 nm, 506 - 586 nm, 624 - 694 nm, 765 - 901 nm (DIGITALGLOBE, 2011).

Figura 12 - Mapa de uso e ocupação do solo elaborado a partir de imagem de alta resolução. Fonte: Paulino (2014).

O mapa apresenta 6 classes temáticas, cujo valor de CN atribuído em cada classe foi obtido junto aos valores recomendados pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos (PMSC, 2011), a saber:

- Vegetação arbórea – compreende a árvores, mata ciliar dos córregos e silvicultura de Pinus. O valor de CN atribuído foi de 60;
- Gramínea – compreende os campos contíguos e entremeados às áreas urbanizadas e terrenos baldios recobertos com gramíneas. O valor de CN atribuído foi de 69;
- Agricultura – engloba as parcelas ocupadas por cultivo de cana-de-açúcar. O valor de CN atribuído foi 74, referente a cultivos em linhas, seguindo as curvas de nível do terreno;
- Solo exposto – compreendem a parcelas de território que apresentaram solo sem cobertura vegetal, estradas sem pavimento e terrenos baldios. O valor de CN atribuído

foi de 86, referente a áreas urbanas em processo de loteamento ou áreas agrícolas em pousio, sem nenhum tipo de cobertura;

- Vias pavimentadas – foram agrupadas as vias pavimentadas, quadras esportivas e praças impermeabilizadas. O valor de CN atribuído foi de 98;
- Telhados – foram enquadrados todos os telhados, independentemente de seus materiais. O valor de CN atribuído foi de 98.

Essas classes foram divididas em 2 grupos: áreas permeáveis e impermeáveis. O primeiro grupo compreende as classes vegetação arbórea, gramínea, agricultura e solo exposto. As áreas impermeáveis compreendem as classes vias pavimentadas e telhados.

O valor de CN médio de cada sub-bacia foi calculado como a média ponderada das áreas permeáveis. A porcentagem de área impermeabilizada foi calculada como a relação entre as áreas impermeabilizadas e a área total. A Tabela 14 apresenta, de forma resumida, os resultados obtidos por Paulino (2014).

Tabela 14 - Valores das áreas e de CN para cada sub-bacia

Sub-bacia	Área (km²)							% IMP	CN
	Vegetação Arbórea	Gramínea	Agricultura	Solo Exposto	Vias Pavimentadas	Telhados	Total		
1	0,22	0,20	0,24	0,22	0,12	0,40	1,41	37	72
2	0,18	0,09	0,00	0,06	0,12	0,39	0,84	61	67
3	0,09	0,08	0,00	0,06	0,04	0,12	0,39	41	70
4	0,19	0,11	0,14	0,34	0,02	0,05	0,84	8	75
5	0,66	0,43	0,00	0,42	0,26	0,60	2,37	36	70
Mineirinho	1,34	0,91	0,38	1,10	0,56	1,56	5,85	36	71

Fonte: Adaptado de Paulino (2014).

Os valores de CN, apresentados na Tabela 14, correspondem aos valores sugeridos para a CAE II, do modelo do SCS. A partir da aplicação das equações Equação 12 e Equação 13, foi encontrado o valor de CN, em cada sub-bacia, para as condições I e III do referido modelo. Os resultados encontram-se na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores de CN para cada sub-bacia em diferentes condições anteriores ao escoamento, segundo o modelo do SCS.

Sub-bacia	CN _I	CN	CN _{III}
1	56	72	86
2	50	67	83
3	53	70	85
4	60	75	88
5	53	70	85
Mineirinho	55	71	85

5.3.2.2 Estimativa dos parâmetros do modelo de Horton

Para estimar a infiltração por meio do modelo de Horton no ABC6, é necessário ao usuário inserir valores para os parâmetros, respeitando os limites presentes no software, a saber:

- A taxa de infiltração máxima do solo, f_o , deve estar compreendida entre 50 e 300 mm/h;
- A taxa de infiltração mínima do solo, f_c , deve estar compreendida entre 1 e 30 mm/h;
- A infiltração acumulada, $F_{(t)}$, deve estar compreendida entre 10 e 50 mm, sendo seu valor padrão igual a 48 mm. A inserção desse valor, por parte do usuário, busca representar as condições de umidade anteriores ao escoamento da bacia;
- O coeficiente de decaimento da infiltração, k , apresenta valor fixo de 2 horas⁻¹ e não permite alterações.

A partir da informação dessas limitações, foram propostos 2 conjuntos de parâmetros para estimativa da infiltração pelo modelo de Horton, apresentados na Tabela 16, utilizados para todas as sub-bacias do Mineirinho.

Tabela 16 - Conjunto de parâmetros propostos para o modelo de Horton.

Conjunto	f_o (mm/h)	f_c (mm/h)
1	200	13
2	127	10

O conjunto 1 da Tabela 16 corresponde aos valores recomendados para solos hidrológicos do tipo B, presentes na Tabela 3. O conjunto 2 compreende os valores recomendados em função do tipo do solo, sendo:

- O valor de f_o corresponde ao valor sugerido para “Solo arenoso seco com pouca ou nenhuma vegetação”, presente na Tabela 5;

O valor de f_c corresponde a, aproximadamente, o valor médio do intervalo recomendado para “Solo arenoso”, presente na

- Tabela 4.

Não foram encontradas recomendações nos manuais do software ABC6 sobre $F_{(t)}$, portanto, para cada conjunto de parâmetros propostos, os valores utilizados foram:

- $F_{(t)} = 30$ mm, o valor médio do intervalo de inserção do parâmetro;
- $F_{(t)}$ decorrente da calibração manual do parâmetro, variando-o a cada 5 mm entre o intervalo de 10 e 50 mm.

5.3.2.3 Estimativa dos parâmetros do modelo de Green-Ampt

Os valores dos parâmetros Z e K do modelo de Green-Ampt são estimados, automaticamente, pelo ABC6, com base nos valores de CN (Tabela 15), resultando na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores de Z e K do modelo de Green-Ampt estimados a partir de valores de CN do solo da bacia do Mineirinho, em diferentes CAE.

Sub-bacia	CAE					
	I		II		III	
	Z (mm)	K (mm/h)	Z (mm)	K (mm/h)	Z (mm)	K (mm/h)
1	25,82	2,97	46,26	0,59	31,36	0,28
2	22,20	4,25	37,68	1,12	38,12	0,28
3	23,08	3,60	40,50	0,79	33,60	0,28
4	29,10	2,17	54,90	0,29	26,28	0,28
5	23,08	3,60	40,50	0,79	33,60	0,28
Mineirinho	25,00	3,17	43,38	0,69	33,60	0,28

5.3.2.4 Estimativa do parâmetro ϕ

Para estimar a infiltração por meio do modelo do Índice ϕ no ABC6, é necessário inserir o valor de ϕ , que deve estar compreendido entre 1 e 40 mm/h. Como não foram encontradas em literatura técnica recomendações sobre esse parâmetro, 8 conjuntos de ϕ foram propostos, variando-o a cada 5 mm/h, entre 5 e 40 mm/h. Em cada simulação, o mesmo valor de ϕ foi atribuído a todas as sub-bacias.

5.3.2.5 Avaliação de desempenho dos modelos de determinação de precipitação efetiva

A avaliação de desempenho dos modelos de determinação de precipitação efetiva consistiu em analisar e comparar o ESD simulado ao observado, por meio da Equação 36.

$$\Delta ESD = 100. \frac{ESD_{est} - ESD_{obs}}{ESD_{obs}} \quad \text{Equação 36}$$

Onde:

ΔESD – diferença percentual entre ESD estimado e o observado;

ESD_{est} – ESD estimado, decorrente da escolha dos parâmetros e do modelo de determinação de precipitação efetiva, em m³;

ESD_{obs} – ESD observado, em m³.

Os critérios de análise foram:

1. O modelo e seu conjunto de parâmetros adotados são considerados adequados à área de estudo quando não estimam valores nulos de ESD;
2. A classificação dos modelos e conjuntos de parâmetros considerados adequados ocorre em função do número de eventos cujo valor de ΔESD calculado seja menor ou igual, em valores absolutos, a 50%.

Os modelos de precipitação efetiva mais bem classificados foram utilizados para as simulações subsequentes.

5.3.3 Modelos de geração de Hidrogramas Sintéticos

Nesse item, descreve-se como foram estimados os parâmetros dos modelos de geração de hidrogramas sintéticos de cheias no ABC6.

5.3.3.1 Modelo do Hidrograma Triangular do SCS

Para geração de hidrogramas sintéticos pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS, não é necessário ao usuário do ABC6 inserir parâmetros adicionais.

5.3.3.2 Modelo de Clark

Para geração de hidrogramas sintéticos pelo modelo de Clark, é necessário ao usuário inserir o fator de forma, n_f , e o valor da constante de propagação, K_{Cl} .

O valor de n_f adotado foi o valor padrão de 1,5 para as 5 sub-bacias do Mineirinho. A razão dessa escolha foi motivada devido à falta de informações no manual do ABC6 e em literatura técnica sobre os valores recomendados.

Para estimar o valor de K_{Cl} , os dados de entrada necessários para a aplicação das equações empíricas de Dooge (Equação 30) e Sabol (Equação 31) foram analisados, sendo que:

- Equação de Dooge – essa equação é recomendada para bacias de grande porte com áreas entre 145 e 948 km², característica não atendida pela área de estudo, visto que as sub-bacias do Mineirinho apresentam áreas inferiores a 2,5 km²;
- Equação de Sabol – não há recomendações sobre os intervalos de área e declividade para sua aplicação, sendo possível sua aplicação para a área de estudo.

Portanto, o valor de K_{Cl} foi determinado pela equação de Sabol e, posteriormente, determinada a constante de amortecimento do reservatório linear de Clark, C. Os valores desses parâmetros, para cada sub-bacia da área de estudo, encontram-se na Tabela 18.

Tabela 18 – Parâmetros do modelo de Clark para cada sub-bacia do córrego do Mineirinho segundo a equação de Sabol.

Sub – Bacia	K _{Cl} – Sabol (horas)	C – Sabol (adm)
1	0,58	0,028
2	0,23	0,068
3	0,15	0,100
4	0,29	0,054
5	0,44	0,036
Mineirinho	1,06	0,015

5.3.3.3 Modelo de Santa Bárbara

Para a geração de hidrogramas sintéticos pelo modelo de Santa Bárbara, não é necessário ao usuário do ABC6 inserir parâmetros adicionais. O software calcula a constante de propagação do modelo K_{SB} (Equação 34) automaticamente. Os valores de K_{SB}, para cada sub-bacia do córrego do Mineirinho, encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19 – Valores determinados para os parâmetros do modelo de Santa Bárbara, para cada sub-bacia do córrego do Mineirinho.

Sub – Bacia	K _{SB}
1	0,025
2	0,053
3	0,071
4	0,043
5	0,029
Mineirinho	0,014

5.3.3.4 Avaliação de desempenho dos modelos de geração de hidrogramas sintéticos

A avaliação de desempenho dos modelos de geração de hidrogramas sintéticos consistiu na comparação dos valores simulados aos observados dos seguintes componentes do hidrograma: vazão de pico, tempo de pico e tempo de base, por meio da Equação 37, Equação 38 e Equação 39.

$$\Delta Q_p = 100. \frac{Q_{p \text{ est}} - Q_{p \text{ obs}}}{Q_{p \text{ obs}}} \quad \text{Equação 37}$$

$$\Delta T_p = 100. \frac{T_{p \text{ est}} - T_{p \text{ obs}}}{T_{p \text{ obs}}} \quad \text{Equação 38}$$

$$\Delta T_b = 100. \frac{T_{b \text{ est}} - T_{b \text{ obs}}}{T_{b \text{ obs}}} \quad \text{Equação 39}$$

Onde:

ΔQ_p – diferença percentual entre vazão de pico estimada e observada;

$Q_{p \text{ est}}$ – vazão de pico estimada, decorrente da escolha do modelo de geração de hidrograma sintético, em m^3/s ;

$Q_{p \text{ obs}}$ – vazão de pico observada, em m^3/s ;

ΔT_p – diferença percentual entre tempo de pico estimado e observado;

$T_{p \text{ obs}}$ – tempo de pico observado, em minutos;

$T_{p \text{ est}}$ – tempo de pico estimado, decorrente da escolha do modelo de geração de hidrograma sintético, em minutos;

ΔT_b – diferença percentual entre tempo de base estimado e observado;

$T_{b \text{ obs}}$ – tempo de base observado, em minutos;

$T_{b \text{ est}}$ – tempo de pico observado, decorrente da escolha do modelo de geração de hidrograma sintético, em minutos;

Os modelos foram analisados por cada componente avaliado, em função das simulações que estimaram valores de diferença percentual menor ou igual, em valores absolutos, a 50%. Posteriormente, os modelos foram ranqueados em ordem crescente em função do número de eventos que apresentaram resultados dentro da faixa proposta.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo, os resultados são apresentados e discutidos em função das formulações e dos modelos presentes no ABC6.

6.1 Tempo de Concentração

Para a determinação do T_c , a metodologia padrão, segundo Tucci (2009), consiste em aplicar a transformação logarítmica no eixo das vazões e determinar o instante temporal, localizado na recessão do hidrograma, onde há mudança de tendência na reta de vazões transformadas.

Contudo, ao realizar esse procedimento nos 12 eventos observados na bacia do Mineirinho, o eixo das vazões não apresentou uma mudança de tendência bem definida. Não foi possível determinar os motivos dessa característica visto que a sonda acústica não acusou erros ou problemas durante a coleta de dados nos eventos selecionados. Por isso, optou-se por não calcular o T_c para cada evento, mas estima-lo para cada sub-bacia pela equação de Kirpich, cujos resultados foram apresentados na Tabela 13.

6.2 Precipitação efetiva

Nesse item, apresentam-se os resultados e a discussão decorrente das simulações executadas no ABC6, referentes aos modelos de determinação de precipitação efetiva.

Ressalta-se que devido à impossibilidade de encontrar o ponto de inflexão dos hidrogramas observados, não foi possível separar o ESD dos demais tipos de escoamentos que contribuem no hidrograma de cheia, sobretudo o escoamento basal.

O procedimento para separar esses tipos de escoamento consiste em determinar o ponto de inflexão que caracteriza a ascensão do hidrograma, e ligá-lo, por meio de uma reta, ao ponto de inflexão da recessão. O volume do hidrograma abaixo dessa reta consiste no escoamento basal.

Para contornar essas dificuldades, medições de vazão usando molinete foram realizadas no córrego do Mineirinho em épocas de estiagem encontrando valores da ordem de 100 l/s. Com base nesses resultados, o escoamento basal foi considerado desprezível na pesquisa, sendo o volume total escoado observado considerado o ESD.

6.2.1 Modelo do SCS

A partir dos valores estimados de CN (item 5.3.2.1), foi avaliado o ESD estimado pelo modelo do SCS, para cada evento chuvoso observado. A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 20 – ESD observado e estimado pela aplicação do modelo do SCS e diferença percentual.

Evento	ESD _{obs} (m ³)	ESD _{est} (m ³)	ΔESD
1	12.438	0	- 100%
2	15.682	0	- 100%
3	42.511	138.392	226%
4	11.819	675	-94%
5	15.123	0	- 100%
6	11.393	14.193	25%
7	35.334	3.559	-90%
8	8.970	0	- 100%
9	6.126	0	- 100%
10	9.928	0	- 100%
11	13.494	0	- 100%
12	49.925	46.116	-8%

Pela análise da Tabela 20, o modelo, apesar de consagrado em literatura técnica, não produziu resultados satisfatórios, pois:

1. Estimou valores nulos de ESD em 7 dos 12 eventos simulados;
2. Apenas os eventos 6 e 12 apresentaram valores de ΔESD menores, em valores absolutos, a 50%;

Em razão desses resultados, o modelo do SCS foi considerado inadequado para estimar o ESD na bacia do Mineirinho. Os possíveis erros e limitações advindos da estimativa do parâmetro CN, entrada principal do modelo, e de suas equações foram investigados, de forma a compreender sua ineficiência para a área de estudo.

Segundo Ponce e Hawkins (1996), o modelo do SCS foi desenvolvido, inicialmente, para um conjunto de dados hidrológicos restritos à região centro-oeste dos EUA, sendo, posteriormente, estendido para outras regiões desse país. Durante essa expansão, dados hidrológicos de 4.000 tipos de solos, com diferentes usos e ocupações, foram adicionados ao modelo. Esforços semelhantes foram realizados por Sartori, Genovez e Lombardi Neto (2005) para estender a classificação hidrológica de solos americanos para os brasileiros, inicialmente proposta por Lombardi Neto *et al.* (1989). O resultado dessas classificações hidrológicas foram tabelas com valores recomendados de CN para os 4 tipos de solos hidrológicos, semelhantes às tabelas fornecidas no Anexo – 1. Entretanto, essas tabelas não conseguem expressar as

características peculiares de cada região, visto representarem a média de uma grande quantidade de solos.

Para incorporar essas peculiaridades é necessário um estudo detalhado dos solos, de seu uso e ocupação e de suas características, estimando um valor de CN mais apropriado para o local. Um exemplo é a metodologia desenvolvida por Kutner, Conte e Nitta (2001) para estimar os valores de CN. Nesse estudo, os autores identificaram as principais formações geológicas presentes na bacia hidrográfica do Alto Tietê na Região Metropolitana de São Paulo (SP) e avaliaram os comportamentos hidráulico e hidrológico dos solos que a constituem. A partir dessa avaliação, foram obtidos valores de CN em função dos 6 principais grupos litológicos da área. Esses valores, posteriormente, foram recomendados no Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da cidade de São Paulo (SP) (PMSP, 2012).

Para o município de São Carlos não há um estudo com esse nível de detalhe. No Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos (PMSC, 2011) constam, apenas, a identificação dos grupos de solos predominantes e sua respectiva classificação hidrológica.

Além das dificuldades de se estimar corretamente valores de CN, D'Asaro, Grillone e Hawkins (2014) citam que esse parâmetro não se apresenta tão invariável durante o evento chuvoso quanto às tabelas indicam. Segundo os autores, o comportamento do parâmetro CN caracteriza-se pelo seu declínio concomitante ao aumento da precipitação total até atingir um valor, aproximadamente, constante, denominado CN_{∞} . Hawkins *et al.*, 2008 classificam esse comportamento do parâmetro CN como padrão da maioria das áreas agrícolas, urbanas e pastagens.

Além disso, outra fonte de incerteza do modelo do SCS é a imposição do valor de I_a em 20% do ARM. Diversas pesquisas mostram que esse valor superestima as perdas decorrentes da interação precipitação com a bacia hidrográfica, sobretudo em bacias urbanas, como, por exemplo:

- Hawkins e Khojeini (2000), ao calibrar os parâmetros do modelo do SCS para dados hidrológicos de 97 bacias hidrográficas de pequeno porte, encontraram valores de I_a entre 0 e 9,7% do ARM;
- Jiang (2001), ao avaliar 28.301 eventos em 307 bacias hidrográficas, apresentou valores de I_a , em 90% dos casos, muito inferiores aos 20% do ARM propostos pelo modelo do SCS. Segundo o autor, os valores de I_a apresentaram valor médio de 7,34% do ARM e em 252 eventos o valor mais apropriado foi de 0.

- D'Asaro, Grillone e Hawkins (2014), ao calibrar e avaliar o comportamento de I_a em 46 bacias italianas de diversas características, sugerem o valor de 5% de ARM como mais representativo para o conjunto de dados em estudo. Esse valor é sugerido, também, por Hawkins *et al.* (2008), para áreas urbanizadas.

Portanto, a escolha do modelo do SCS não deve ser pautada, apenas, na classificação do uso e ocupação do solo visando a atribuir um valor de CN fixo e invariável. Devem-se estudar as características e peculiaridades da área a fim de avaliar o comportamento dos parâmetros CN e a porcentagem de I_a e suas respectivas influências nos resultados do modelo.

6.2.2 Modelo de Horton

Para o 1º grupo de simulações pelo modelo de Horton, fixando o valor de $F_{(t)}$ em 30 mm, os valores estimados de ESD encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21 – ESD observado e estimado pela aplicação do modelo de Horton, com $F_{(t)}$ igual a 30 mm, e diferença percentual.

Evento	ESD _{obs} (m³)	Conjunto 1		Conjunto 2	
		ESD _{est} (m³)	ΔESD	ESD _{obs} (m³)	ΔESD
1	12.438	0	- 100%	806	-94%
2	15.682	92	-99%	10.225	-35%
3	42.511	25.707	-40%	94.060	121%
4	11.819	0	- 100%	2.084	-82%
5	15.123	739	-95%	12.022	-21%
6	11.393	5.860	-49%	30.708	170%
7	35.334	2.150	-94%	28.320	-20%
8	8.970	0	- 100%	1.697	-81%
9	6.126	0	- 100%	869	-86%
10	9.928	580	-94%	10.982	11%
11	13.494	67	-99%	5.303	-61%
12	49.925	32.144	-36%	119.805	140%

Pela análise da Tabela 21, verificou-se que:

1. O conjunto 1 estimou valores nulos de ESD em 4 eventos (1, 4, 8 e 9) e valores próximos a nulidade em 5 eventos (2, 5, 7, 10 e 11). Observa-se, também, que todos os eventos simulados por esse conjunto subestimaram o ESD e que apenas os eventos 3, 6 e 12 estavam na faixa de ΔESD recomendada;
2. O conjunto 2 estimou valores não nulos de ESD em todos os eventos observados e apresentou valores de ΔESD dentro da faixa proposta em 4 eventos (2, 5, 7 e 10).

Para o 2º grupo de simulações pelo modelo de Horton, foram utilizados os valores de $F_{(t)}$ calibrados manualmente, presentes na Tabela 22. Os resultados de ESD encontram-se na Tabela 23.

Tabela 22 - Valores de $F_{(t)}$ determinados por calibração manual para os conjuntos de parâmetros 1 e 2 propostos para o modelo de Horton.

Evento	Conjunto 1	Conjunto 2
1	50	50
2	50	35
3	40	10
4	50	40
5	50	35
6	40	10
7	50	35
8	50	40
9	50	40
10	50	30
11	50	40
12	40	10

Tabela 23 - ESD estimado pela aplicação do modelo de Horton, com $F_{(t)}$ calibrado, e diferença percentual.

Evento	ESD _{obs} (m³)	Conjunto 1		Conjunto 2	
		ESD _{est} (m³)	Δ ESD	ESD _{est} (m³)	Δ ESD
1	12.438	0	- 100%	12.535	1%
2	15.682	1.840	-88%	16.255	4%
3	42.511	39.647	-7%	50.975	20%
4	11.819	0	- 100%	8.675	-27%
5	15.123	3.497	-77%	16.294	8%
6	11.393	10.404	-9%	14.222	25%
7	35.334	10.587	-70%	36.250	3%
8	8.970	0	- 100%	8.190	-9%
9	6.126	0	- 100%	4.223	-31%
10	9.928	2.726	-73%	10.982	11%
11	13.494	899	-93%	12.060	-11%
12	49.925	49.954	0%	66.309	33%

Pela análise da Tabela 23, nota-se que:

1. O conjunto 1, apesar de calibrado, apresentou resultados semelhantes aos observados na Tabela 21. Idem aos resultados anteriores, valores nulos de ESD foram estimados para os eventos 1, 4, 8 e 9 e apenas os eventos 3, 6 e 12 estavam na faixa de Δ ESD recomendada;

2. O conjunto 2, após calibração, apresentou notável melhora uma vez que todos os eventos simulados apresentaram ΔESD menor ou igual, em valores absolutos, a 50%.

Esses resultados mostram que o conjunto 1, cujos valores dos parâmetros são sugeridos por Porto (1995) e recomendados pelo Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da cidade de São Paulo (SP) (PMSP, 2012), superestimou a infiltração. Segundo as referências consultadas, esses valores baseiam-se apenas na classificação hidrológica dos solos, sem mencionar, entretanto, as condições de sua determinação. A carência dessas informações, portanto, não permite uma extrapolação para outras áreas, como sugerem as obras supracitadas. Apesar dos resultados satisfatórios do conjunto 2 com $F_{(t)}$ calibrado, essas críticas podem ser estendidas aos valores sugeridos por Akan (1993), pois também não há menção às condições de sua determinação.

A principal crítica quanto à escolha do modelo de Horton para estimativa do ESD no ABC6 reside na falta de recomendações sobre o parâmetro $F_{(t)}$ nos manuais do software. Huber & Dickinson (1988), ao detalhar a rotina computacional do modelo, explicam que o parâmetro $F_{(t)}$ busca representar as condições anteriores ao escoamento, semelhante ao modelo do SCS, esperando-se a seguinte relação:

- Maiores valores de $F_{(t)}$ correspondem a eventos na CAE III do modelo do SCS, estimando valores maiores de ESD;
- Menores valores de $F_{(t)}$ correspondem a eventos na CAE I do modelo do SCS, estimando valores menores de ESD.

Entretanto, a relação entre a CAE e o valor de $F_{(t)}$ não foi observada. Os eventos 2 e 8, classificados na condição anterior de umidade antecedente I, apresentaram valores calibrados de $F_{(t)}$ acima do valor médio de 30 mm, sendo:

- Conjunto 1 – ambos os valores calibrados foram de 50 mm, valor máximo do parâmetro $F_{(t)}$ no ABC6;
- Conjunto 2 – os valores foram de 35 e 40 mm para, respectivamente, os eventos 2 e 8 que são, respectivamente, 17 e 33% maiores que o valor médio do intervalo.

Os eventos 3 e 6, classificados na CAE III, apresentaram os seguintes valores calibrados de $F_{(t)}$:

- Conjunto 1 – ambos os valores calibrados foram de 40 mm;
- Conjunto 2 – ambos os valores calibrados foram de 10 mm, valor mínimo do parâmetro $F_{(t)}$ no ABC6.

Para os demais eventos, classificados na CAE II, os valores calibrados de $F_{(t)}$ foram:

- Conjunto 1 – excetuando o evento 12, cujo valor de $F_{(t)}$ foi de 40 mm, os demais apresentaram valor de $F_{(t)}$ igual a 50 mm;
- Conjunto 2 – houve uma heterogeneidade maior de valores calibrados, sendo: evento 1, 50 mm; eventos 4, 9 e 11, 40 mm; eventos 5 e 7, 35 mm; evento 10, 30 mm; e evento 12, 10 mm. A média dos valores de $F_{(t)}$ foi de 35 mm.

Em geral, foi observada grande diversidade nos valores de $F_{(t)}$ decorrentes da calibração, o que pode indicar uma compensação de erros e ou incertezas no modelo. Esses problemas podem advir de erros no processo de aquisição de dados ou da estimativa dos parâmetros do modelo. Dessa forma, não foi possível estabelecer uma metodologia confiável para estimar esse parâmetro. Esse resultado mostra a fragilidade do modelo de Horton no ABC6, pois não é permitido ao usuário alterar o valor do coeficiente de decaimento da infiltração, k , e é requerida a inserção de $F_{(t)}$, parâmetro de difícil determinação e sem recomendações na literatura técnica consultada.

6.2.3 Modelo de Green-Ampt

A partir dos valores de Z e f_c , presentes na Tabela 17, foi estimado o ESD pelo modelo de Green-Ampt no ABC6. Os resultados encontram-se na Tabela 24.

Tabela 24 – ESD observado e estimado pela aplicação do modelo de Green-Ampt e diferença percentual.

Evento	ESD _{obs} (m ³)	ESD _{est} (m ³)	Δ ESD
1	12.438	25.424	104%
2	15.682	44.953	187%
3	42.511	234.793	452%
4	11.819	57.600	387%
5	15.123	52.947	250%
6	11.393	75.973	567%
7	35.334	86.545	145%
8	8.970	27.107	202%
9	6.126	23.899	290%
10	9.928	44.307	346%
11	13.494	48.485	259%
12	49.925	205.605	312%

Pela análise da Tabela 24, verificou-se que o modelo de Green-Ampt não estimou valores nulos de ESD nos eventos selecionados, atendendo ao critério 1 da metodologia de avaliação de desempenho. Contudo, todas as simulações executadas superestimaram o ESD observado, destacando-se os eventos 3 e 6 com valores de Δ ESD de, respectivamente, 452% e 567%.

A principal crítica em relação à aplicação desse modelo reside na falta de informações nas referências consultadas - Porto (1995) e manuais do ABC6 – sobre o processo de correlação automática entre os valores de CN e os parâmetros Z e K. Esse lapso de informações, somado às incertezas referentes à estimativa e ao comportamento do parâmetro CN, conforme discutido no item 6.2.1, fazem o modelo de difícil aplicação e generalização em estudos hidrológicos.

6.2.4 Modelo do Índice φ

A partir dos 8 conjuntos de valores de φ foi estimado o ESD por esse modelo. Os resultados encontram-se na Tabela 25 e Tabela 26.

Tabela 25 - ESD observado e estimado pela aplicação do modelo do Índice φ e diferença percentual, parte I.

Evento	ESD _{obs} (m ³)	$\varphi = 5$ mm/h		$\varphi = 10$ mm/h		$\varphi = 15$ mm/h		$\varphi = 20$ mm/h	
		ESD _{est} (m ³)	Δ ESD	ESD _{est} (m ³)	Δ ESD	ESD _{est} (m ³)	Δ ESD	ESD _{est} (m ³)	Δ ESD
1	12.438	29.309	136%	18.311	47%	11.349	-9%	6.845	-45%
2	15.682	64.877	314%	51.129	226%	38.259	144%	26.618	70%
3	42.511	180.297	324%	139.581	228%	117.936	177%	104.481	146%
4	11.819	56.277	376%	33.638	185%	18.252	54%	7.137	-40%
5	15.123	58.617	288%	46.274	206%	35.100	132%	26.793	77%
6	11.393	74.120	551%	65.345	474%	56.394	395%	48.146	323%
7	35.334	88.218	150%	71.721	103%	57.623	63%	45.689	29%
8	8.970	48.204	437%	32.058	257%	18.603	107%	10.940	22%
9	6.126	28.607	367%	19.715	222%	12.870	110%	7.196	17%
10	9.928	49.199	396%	38.669	289%	29.367	196%	23.108	133%
11	13.494	46.917	248%	29.718	120%	18.603	38%	12.636	-6%
12	49.925	206.213	313%	182.403	265%	159.062	219%	137.183	175%

Tabela 26 - ESD observado e estimado pela aplicação do modelo do Índice φ e diferença percentual, parte II.

Evento	ESD _{obs} (m ³)	$\varphi = 25$ mm/h		$\varphi = 30$ mm/h		$\varphi = 35$ mm/h		$\varphi = 40$ mm/h	
		ESD _{est} (m ³)	Δ ESD	ESD _{est} (m ³)	Δ ESD	ESD _{est} (m ³)	Δ ESD	ESD _{est} (m ³)	Δ ESD
1	12.438	4.037	-68%	1.989	-84%	527	-96%	0	- 100%
2	15.682	16.497	5%	8.424	-46%	4.212	-73%	761	-95%
3	42.511	93.191	119%	82.251	93%	72.014	69%	63.297	49%
4	11.819	2.457	-79%	468	-96%	0	- 100%	0	- 100%
5	15.123	21.177	40%	15.210	1%	12.227	-19%	9.419	-38%
6	11.393	41.009	260%	34.223	200%	29.075	155%	25.038	120%
7	35.334	34.749	-2%	25.448	-28%	18.896	-47%	15.093	-57%
8	8.970	4.388	-51%	702	-92%	0	- 100%	0	- 100%
9	6.126	2.808	-54%	644	-89%	0	- 100%	0	- 100%
10	9.928	18.135	83%	14.157	43%	10.179	3%	6.435	-35%
11	13.494	8.775	-35%	5.499	-59%	3.042	-77%	1.346	-90%
12	49.925	116.591	134%	95.297	91%	76.518	53%	60.548	21%

Pela análise da Tabela 25 e Tabela 26, tem-se que:

1. Os conjuntos φ iguais a 35 e 40 mm/h não se mostraram adequados para estimar o ESD na área de estudo, visto que: para φ igual a 35 mm/h, valores nulos de ESD foram estimados para os eventos 4, 8 e 9; para φ igual a 40 mm/h, além desses 3 eventos, também foi estimado valores nulos de ESD para o evento 1;
2. As demais simulações executadas foram consideradas adequadas segundo o critério 1. Quanto ao critério 2, o número de eventos com Δ ESD na faixa proposta foi variável, sendo: para φ igual a 5 mm/h, nenhum dos eventos; para φ igual a 10 mm/h, apenas 1 evento; para φ igual a 15 mm/h, 2 eventos; para φ igual a 20 mm/h, 6 eventos; para φ igual a 25 mm/h, 4 eventos; e, para φ igual a 30 mm/h, 4 eventos.

O modelo do Índice φ mostrou-se de fácil aplicação durante as simulações executadas, visto que apresenta apenas um parâmetro de entrada que varia segundo uma relação linear simples: maior o valor de φ estimado acarreta menor valor de ESD e vice-versa.

A dificuldade da aplicação do modelo residiu na falta de recomendações técnicas quanto à escolha de φ . Segundo a definição do modelo, o Índice φ é uma aproximação do modelo de Horton quanto $f_{(t)}$ tende a f_c . Pela definição, portanto, os melhores resultados para aplicação do modelo eram esperados na faixa de φ variando entre 10 e 15 mm/h, que são valores próximos aos valores de f_c recomendados pela Tabela 16, com ligeiras variações em função da condição de umidade anterior ao escoamento. Essas relações, entretanto, não foram observadas, conforme pode ser observado na Tabela 27.

Tabela 27 – Melhores valores de ϕ para cada evento simulado, determinados por calibração manual.

Evento	CAE	ϕ (mm/h)
1	II	15
2	I	25
3	III	40
4	II	20
5	II	30
6	III	40
7	II	25
8	I	20
9	II	20
10	II	35
11	II	20
12	II	40

Pela análise da Tabela 27, percebe-se que:

- Os eventos 2 e 8, classificados na CAE I, apresentaram melhores valores de ΔESD com parâmetro ϕ calibrado em, respectivamente, 25 e 20 mm/h;
- Os eventos 3 e 6, classificados na CAE III, apresentaram melhores valores de ΔESD com parâmetro ϕ calibrado em ambos os casos de 40 mm/h;
- Os demais eventos, classificados na CAE II, apresentaram grande diversidade dos valores de ϕ calibrados, sendo igual a: 15 mm/h, para o evento 1; 20 mm/h, para os eventos 4, 9 e 11; 25 mm/h, para o evento 7; 30 mm/h, para o evento 5; 35 mm/h, para o evento 10; e 40 mm/h, para o evento 12. O valor médio do parâmetro ϕ para esses eventos foi de, aproximadamente, 26 mm/h, resultado 30% superior a 20 mm/h, valor que estimou o maior número de eventos com ΔESD na faixa proposta.

Em função dessa grande diversidade de valores, recomenda-se, em estudos hidrológicos para áreas urbanas, a variação do parâmetro ϕ a cada 5 mm/h, entre 20 e 40, permitindo ao usuário do ABC6 avaliar a diferença entre os valores de ESD estimados.

6.2.5 Avaliação geral dos modelos de determinação de precipitação efetiva

A síntese dos resultados da avaliação de desempenho dos modelos de determinação da precipitação efetiva encontra-se na Tabela 28.

Tabela 28 - Síntese dos resultados obtidos nos modelos de determinação de precipitação efetiva.

Modelo	Conjunto de Parâmetros	Critério 1 (Adequado/Não Adequado)	Critério 2 (nº de eventos)	Ranque
SCS	Tabela 15	NAd	3	-
Horton	Conjunto 1 – $F(t) = 30$ mm	NAd	3	-
	Conjunto 2 – $F(t) = 30$ mm	Ad	4	3
	Conjunto 1 – $F(t)$ calibrado	NAd	3	-
	Conjunto 2 – $F(t)$ calibrado	Ad	12	1
Green - Ampt	Tabela 17	Ad	0	6
Índice φ	$\varphi = 5$ mm/h	Ad	0	6
	$\varphi = 10$ mm/h	Ad	1	5
	$\varphi = 15$ mm/h	Ad	2	4
	$\varphi = 20$ mm/h	Ad	6	2
	$\varphi = 25$ mm/h	Ad	4	3
	$\varphi = 30$ mm/h	Ad	4	3
	$\varphi = 35$ mm/h	NAd	3	-
	$\varphi = 40$ mm/h	NAd	4	-

Pela análise da Tabela 28, 9 conjuntos de parâmetros, ranqueados de 1 (mais recomendado) a 6 (menos recomendado), podem ser utilizados para estimar o ESD na bacia do Mineirinho.

Os resultados obtidos suscitaram a dúvida de quão válidos se apresentam os modelos e seus parâmetros presentes em literatura técnica para estimar a precipitação efetiva. Neste trabalho, a coleta de dados hidrológicos para comparações e análises possibilitou uma avaliação de quais modelos e parâmetros mostram-se mais adequados para a bacia do Mineirinho. Esse procedimento, entretanto, mostra-se na contramão da realidade brasileira, visto a carência desses dados, sobretudo em áreas urbanas.

6.3 Geração de hidrogramas sintéticos

Nesse item, os resultados pela aplicação dos modelos de geração de hidrogramas sintéticos são apresentados, assim como as discussões pertinentes. Para aplica-los, foram selecionados os 2 modelos melhor estimaram o ESD (Tabela 28), sendo: o conjunto 2 do modelo de Horton, com valor de $F(t)$ calibrado; e, o conjunto φ igual a 20 mm/h.

Para facilitar a nomenclatura, as seguintes abreviações foram doravante adotadas: MHT, MCS e MSB para denominar, respectivamente: o modelo do Hidrograma Triangular do SCS; o modelo de Clark, utilizando a constante de Sabol; e, o modelo de Santa Barbara.

Os resultados referentes aos componentes do hidrograma (Q_p , T_p e T_b) são apresentados nos itens a seguir. Os resultados gráficos são apresentados nos Apêndices de B a D, sendo que:

- Os hidrogramas sintéticos gerados a partir do MHT encontram-se no Apêndice C, da Figura 28 a Figura 39;
- Os hidrogramas sintéticos gerados a partir do MCS encontram-se no Apêndice D, da Figura 40 a Figura 51;
- Os hidrogramas sintéticos gerados a partir do MSB encontram-se no Apêndice E, da Figura 52 a Figura 63.

6.3.1 Vazão de pico

Os valores estimados de Q_p obtidos pela aplicação dos modelos de geração de hidrogramas sintéticos para os modelos de precipitação efetiva selecionados encontram-se na Tabela 29 e na Tabela 30.

Tabela 29 – Variação da vazão de pico dos hidrogramas gerados utilizando o modelo de Horton.

Evento	$Q_{p\text{ obs}}$ (m ³ /s)	MHT		MCS		MSB	
		$Q_{p\text{ est}}$ (m ³ /s)	ΔQ_p	$Q_{p\text{ est}}$ (m ³ /s)	ΔQ_p	$Q_{p\text{ est}}$ (m ³ /s)	ΔQ_p
1	2,45	4,86	98%	3,66	49%	3,39	38%
2	4,43	6,35	43%	4,80	8%	4,57	3%
3	5,74	18,50	222%	13,85	141%	13,13	129%
4	2,92	3,13	7%	2,45	-16%	2,31	-21%
5	3,38	6,57	94%	4,93	46%	4,58	35%
6	2,95	5,88	99%	4,37	48%	4,09	39%
7	6,62	12,69	92%	9,83	48%	9,59	45%
8	2,71	2,97	10%	2,34	-13%	2,21	-18%
9	1,73	1,75	1%	1,32	-24%	1,25	-28%
10	2,90	4,52	56%	3,35	15%	3,15	9%
11	3,63	4,75	31%	3,52	-3%	3,32	-9%
12	12,46	18,39	48%	15,33	23%	15,74	26%

Pela análise da Tabela 29, observou-se que:

- O MHT apresentou 6 eventos simulados na faixa de ΔQ_p proposta;
- O MCS e o MSB apresentaram os mesmos 11 eventos simulados na faixa de ΔQ_p proposta, excetuando-se o evento 3. Percebe-se, também, que os valores gerados de Q_p calculados pelos 2 modelos mostraram-se próximos.

Tabela 30 – Variação da vazão de pico dos hidrogramas gerados a partir do Índice φ .

Evento	$Q_{p \text{ obs}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	MHT		MCS		MSB	
		$Q_{p \text{ est}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	ΔQ_p	$Q_{p \text{ est}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	ΔQ_p	$Q_{p \text{ est}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	ΔQ_p
1	2,45	2,84	16%	2,08	-15%	1,96	-20%
2	4,43	10,21	131%	7,71	74%	7,38	67%
3	5,74	40,14	600%	30,25	427%	28,88	403%
4	2,92	2,88	-1%	2,15	-27%	2,04	-30%
5	3,38	10,88	222%	8,04	138%	7,58	124%
6	2,95	19,50	562%	14,43	389%	13,60	362%
7	6,62	15,71	137%	12,27	85%	12,02	82%
8	2,71	4,35	61%	3,25	20%	3,09	14%
9	1,73	2,95	70%	2,17	25%	2,05	18%
10	2,90	9,48	227%	6,98	140%	6,57	126%
11	3,63	5,14	42%	3,79	4%	3,58	-1%
12	12,46	38,23	207%	31,92	156%	31,68	154%

Pela análise da Tabela 30, nota-se que:

- O MHT apresentou apenas 3 eventos com valor de Q_p na faixa proposta;
- Idem aos resultados obtidos na Tabela 29, o MCS e o MSB apresentaram os mesmos 5 eventos simulados na faixa de ΔQ_p proposta, com valores gerados de Q_p muito próximos;

Pela análise conjunta das Tabela 29 e Tabela 30, constatou-se que o MHT superestima os valores de Q_p , independentemente do modelo de precipitação efetiva escolhido. Salvo o evento 4 da Tabela 30 cujo valor de ΔQ_p foi subestimado em 1%, as demais simulações apresentaram valores superiores à zero, destacando-se:

- Evento 3 da Tabela 29, com ΔQ_p de 222%;
- Eventos 2, 3, 5, 7, 10 e 12 da Tabela 30, com, respectivamente, ΔQ_p de 131%, 600%, 222%, 562%, 137%, 227% e 207%.

Uma possível explicação para esse comportamento advém da própria característica do modelo de não incorporar os fenômenos de translação e amortecimento na bacia hidrográfica.

O MCS e o MSB, caracterizados por incorporar os fenômenos de translação e amortecimento, apresentaram resultados semelhantes entre si para todos os eventos. Esse comportamento deve-se provavelmente à semelhança entre a Equação 29 e Equação 33 e à proximidade entre os valores estimados do coeficiente de amortecimento do reservatório linear, C , e K_{SB} , sendo essa diferença apresentada na 4ª coluna da Tabela 31.

$$Q(t) = Q_{(t-\Delta t)} + C \cdot [I_{(t-\Delta t)} + I_{(t)} - 2Q_{(t-\Delta t)}] \quad \text{Equação 29}$$

$$Q(t) = Q_{(t-\Delta t)} + K_{sb}[I_{(t-\Delta t)} + I_{(t)} - 2Q_{(t-\Delta t)}] \quad \text{Equação 33}$$

Tabela 31 - Diferença entre os valores do coeficiente de amortecimento de Sabol e da constante de Santa Bárbara.

Sub – Bacia	C – Sabol (adm)	K _{SB} (adm)	C _{Sabol} – K _{SB}
1	0,028	0,025	0,3%
2	0,068	0,053	1,5%
3	0,100	0,071	2,9%
4	0,054	0,043	1,1%
5	0,036	0,029	0,7%
Mineirinho	0,015	0,014	0,1%

A Tabela 32 foi elaborada para avaliar qual modelo de geração de hidrograma sintético melhor estimou a Q_p . Analisando-a, observa-se que o MCS e o MSB são mais recomendados que o MHT para estimar a Q_p na bacia do Mineirinho.

Tabela 32 – Número de eventos simulados com Q_p dentro da faixa proposta.

Modelos de Geração de Hidrogramas Sintéticos	Modelo de determinação de precipitação efetiva		Total	Rankue
	Modelo de Horton	Índice ϕ		
MHT	6	3	9	2
MCS	11	5	16	1
MSB	11	5	16	1

6.3.2 Tempo de pico

Os valores estimados de T_p obtidos pela aplicação dos modelos de geração de hidrogramas sintéticos utilizando os modelos de determinação de precipitação efetiva selecionados encontram-se, respectivamente, na Tabela 33 e na Tabela 34.

Tabela 33 – Variação do tempo de pico dos hidrogramas gerados a partir do modelo de Horton.

Evento	$T_{p\text{ obs}}$ (minutos)	MHT		MCS		MSB	
		$T_{p\text{ est}}$ (minutos)	ΔT_p	$T_{p\text{ est}}$ (minutos)	ΔT_p	$T_{p\text{ est}}$ (minutos)	ΔT_p
1	56	30	-46%	38	-32%	26	-54%
2	42	42	0%	50	19%	38	-10%
3	54	38	-30%	44	-19%	32	-41%
4	48	44	-8%	52	8%	42	-13%
5	22	28	27%	36	64%	24	9%
6	28	34	21%	42	50%	30	7%
7	62	50	-19%	56	-10%	42	-32%
8	22	36	64%	44	100%	36	64%
9	50	38	-24%	46	-8%	36	-28%
10	52	34	-35%	42	-19%	30	-42%
11	60	50	-17%	58	-3%	44	-27%
12	66	62	-6%	66	0%	52	-21%

Pela análise da Tabela 33, constatou-se que:

- O MHT estimou ΔT_p dentro da faixa proposta para quase todos os eventos, salvo o evento 8 com ΔT_p de 64%;
- O MCS e o MSB estimaram ΔT_p dentro da faixa proposta para 10 eventos. No primeiro, o T_p dos eventos 5 e 8 foram superestimados em, respectivamente, 64% e 100%. No MSB, por sua vez, o T_p do evento 5 foi subestimado em 54% e do evento 8, superestimado em 64%.

Tabela 34 – Variação do tempo de pico dos hidrogramas gerados a partir do Índice ϕ .

Evento	$T_{p \text{ obs}}$ (minutos)	MHT		MCS		MSB	
		$T_{p \text{ est}}$ (minutos)	ΔT_p	$T_{p \text{ est}}$ (minutos)	ΔT_p	T_p Estimada (minutos)	ΔT_p
1	56	28	-50%	36	-36%	22	-61%
2	42	40	-5%	48	14%	34	-19%
3	54	38	-30%	44	-19%	30	-44%
4	48	40	-17%	48	0%	34	-29%
5	22	28	27%	36	64%	22	0%
6	28	34	21%	42	50%	28	0%
7	62	46	-26%	54	-13%	40	-35%
8	22	32	45%	40	82%	28	27%
9	50	38	-24%	46	-8%	32	-36%
10	52	34	-35%	42	-19%	28	-46%
11	60	48	-20%	56	-7%	42	-30%
12	66	44	-33%	58	-12%	50	-24%

Pela análise da Tabela 34, os seguintes resultados foram observados:

- Todas as simulações executadas no MHT apresentaram ΔT_p dentro da faixa proposta;
- Idem aos resultados observados para a Tabela 33, o MCS superestima o T_p dos eventos 5 e 8 em, respectivamente, 64% e 82%;
- Excetuando-se o evento 1 com ΔT_p de -61%, o MSB apresentou T_p dentro da faixa de valores propostos para os demais eventos.

Para avaliar qual modelo de geração de hidrogramas sintéticos melhor estimou o T_p foi elaborada a Tabela 35. Analisando-a, verifica-se que o MHT mostrou-se mais adequado que os demais para estimar esse parâmetro temporal. Todavia, o MCS e o MSB apresentaram resultados muito próximos aos produzidos pelo MHT.

Tabela 35 – Número de eventos simulados com T_p dentro da faixa proposta em metodologia.

Modelo de Geração de Hidrogramas Sintéticos	Modelo de determinação de precipitação efetiva		Total	Rankue
	Modelo de Horton	Índice ϕ		
MHT	11	12	23	1
MCS	10	10	20	3
MSB	10	11	21	2

6.3.3 Tempo de base

Os valores estimados de T_b obtidos pela aplicação dos modelos de geração de hidrogramas sintéticos utilizando os resultados obtidos da aplicação do modelo de Horton e Índice ϕ encontram-se, respectivamente, na Tabela 36 e na Tabela 37.

Tabela 36 – Variação do tempo de base dos hidrogramas gerados a partir do modelo de Horton.

Evento	$T_{b \text{ obs}}$ (minutos)	MHT		MCS		MSB	
		$T_{b \text{ est}}$ (minutos)	ΔT_b	$T_{b \text{ est}}$ (minutos)	ΔT_b	$T_{b \text{ est}}$ (minutos)	ΔT_b
1	228	114	-50%	144	-37%	140	-39%
2	180	134	-26%	170	-6%	168	-7%
3	400	226	-44%	262	-35%	262	-35%
4	220	146	-34%	176	-20%	176	-20%
5	248	136	-45%	184	-26%	184	-26%
6	206	222	8%	196	-5%	198	-4%
7	388	170	-56%	226	-42%	230	-41%
8	176	132	-25%	168	-5%	166	-6%
9	184	132	-28%	166	-10%	164	-11%
10	198	202	2%	296	49%	308	56%
11	242	152	-37%	192	-21%	192	-21%
12	238	272	14%	188	-21%	186	-22%

Pela análise da Tabela 36, os seguintes resultados foram observados:

- O MHT apresentou ΔT_b dentro da faixa proposta em 11 eventos, subestimando esse parâmetro apenas no evento 7 em 56%;
- O MCS apresentou ΔT_b dentro da faixa proposta em todas as simulações executadas;
- O MSB apresentou ΔT_b dentro da faixa proposta em 11 eventos, superestimando esse parâmetro apenas no evento 10 em 56%.

Tabela 37 – Variação do tempo de base dos hidrogramas gerados a partir do modelo do Índice ϕ .

Evento	$T_{b\text{ obs}}$ (minutos)	MHT		MCS		MSB	
		$T_{b\text{ est}}$ (minutos)	ΔT_b	$T_{b\text{ est}}$ (minutos)	ΔT_b	$T_{b\text{ est}}$ (minutos)	ΔT_b
1	228	100	-56%	129	-43%	120	-47%
2	180	142	-21%	186	3%	186	3%
3	400	168	-58%	232	-42%	238	-41%
4	220	136	-38%	174	-21%	172	-22%
5	248	146	-41%	202	-19%	204	-18%
6	206	170	-17%	240	17%	246	19%
7	388	172	-56%	234	-40%	238	-39%
8	176	214	22%	180	2%	180	2%
9	184	142	-23%	188	2%	190	3%
10	198	214	8%	324	64%	338	71%
11	242	150	-38%	196	-19%	196	-19%
12	238	160	-33%	208	-13%	208	-13%

Pela análise da Tabela 37, constatou-se que:

- O MHT apresentou ΔT_b dentro da faixa proposta em 9 eventos, subestimando esse parâmetro nos eventos 1, 3 e 7 em, respectivamente, 56%, 58% e 56%;
- O MCS e o MSB apresentaram ΔT_b dentro da faixa proposta em 11 eventos, superestimando esse parâmetro apenas no evento 10 em, respectivamente, 64% e 71%;

Pela análise conjunta das 2 tabelas supracitadas, observou-se que o MCS e o MSB estimaram valores de T_b próximos entre si para todos os eventos simulados. Assim como na análise de Q_p , uma possível explicação é a similaridade entre as equações dos modelos, conforme explicado no item 6.3.1.

Analisando a Tabela 38, que apresenta a comparação generalizada dos modelos de geração de hidrogramas sintéticos, verifica-se que o melhor modelo para estimar a T_b na bacia do Mineirinho é o MCS, seguido do MSB e, por fim, do MHT.

Tabela 38 – Número de eventos simulados com T_b dentro da faixa proposta em metodologia.

Modelo de Geração de Hidrogramas Sintéticos	Modelo de determinação de precipitação efetiva		Total	Ranque
	Modelo de Horton	Índice ϕ		
MHT	11	9	20	3
MCS	12	11	23	1
MSB	11	11	22	2

6.3.4 Avaliação geral dos modelos de geração de hidrogramas sintéticos

A síntese dos resultados da avaliação de desempenho dos modelos de geração de hidrogramas sintéticos encontra-se na Tabela 39. Os resultados não foram ranqueados de

maneira a obter uma ordenação única entre os 3 modelos avaliados, uma vez que é mais interessante ao usuário/tomador de decisão escolhê-lo em função do parâmetro desejado.

Tabela 39 - Síntese dos resultados obtidos nos modelos de geração de hidrogramas sintéticos.

Modelo de geração de hidrogramas sintéticos	Ranque obtido em cada componente		
	Q_p	T_p	T_b
MHT	2	1	3
MCS	1	3	1
MSB	1	2	2

A principal dificuldade encontrada nessa etapa do trabalho foi estimar o parâmetro n_f do modelo de Clark. A equação utilizada para calcular esse parâmetro não foi encontrada em literatura técnica, sendo utilizado o valor padrão de 1,5. Silveira (2010) analisou a sensibilidade desse parâmetro na geração de hidrogramas sintéticos, variando-o entre 1 e 2, em intervalos de 0,2. A variação máxima de Q_p encontrada foi de, aproximadamente, 11% em todas as simulações executadas pela autora. Recomenda-se, portanto, realizar a análise de sensibilidade semelhantemente ao estudo descrito ou utilizar outro modelo de geração de hidrogramas sintéticos.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A proposta desse trabalho foi comparar e avaliar os modelos de determinação precipitação efetiva e geração de hidrogramas de cheia presentes no ABC6. Devido à presença de dados hidrológicos coletados em campo, foi possível a comparação e a avaliação entre os hidrogramas simulados e observados, conferindo ao trabalho um caráter essencialmente prático.

Sobre a análise crítica das fórmulas para cálculo do tempo de concentração, concluiu-se ser extremamente importante verificar recomendações teóricas e práticas presentes em literatura técnica. Pelas recomendações teóricas, nenhuma das fórmulas presentes no software mostrou-se apta para estimar esse parâmetro nas sub-bacias da área de estudo. Pelas recomendações práticas apresentadas por Silveira (2005), a fórmula de Kirpich mostrou-se adequada para estimar o tempo de concentração nas sub-bacias do Mineirinho. Portanto, recomenda-se ao profissional ligado à área de Recursos Hídricos, durante o estudo hidrológico, procurar informações que embasem a aplicação da fórmula de tempo de concentração escolhida.

Quanto aos modelos de determinação da precipitação efetiva, o modelo de Horton com valores de $F_{(t)}$ calibrados e Índice ϕ , com ϕ igual a 20 mm/h, foram considerados os mais adequados para os eventos selecionados. Contudo, esses resultados só foram possíveis de serem obtidos a partir dos dados observados de chuva e vazão. Essa situação não é a usual da maioria dos estudos e projetos da área de recursos hídricos no Brasil. O modelo do SCS, apesar de consagrado em literatura técnica, não produziu resultados satisfatórios. O modelo de Green-Ampt, com parâmetros estimados a partir dos valores de CN, superestimou em demasia os valores de ESD em todos os eventos analisados, não sendo recomendado para estimar a precipitação efetiva na área de estudo. Para superar essas dificuldades, recomenda-se:

- Expansão das redes de monitoramento de dados pluviométricos e/ou fluviométricos quando viável, em termos técnicos e econômicos, para áreas urbanas;
- Parametrização dos modelos de determinação de precipitação efetiva em função das características das bacias brasileiras. Frisa-se que, pelas dimensões continentais do Brasil, esses estudos devem ser subdivididos por regiões devido às características únicas encontradas nos biomas brasileiros;
- Atualização das rotinas de cálculo do software ABC6, permitindo ao usuário, por exemplo, inserir valores diferentes para: I_a do modelo do SCS; e k , para o modelo de Horton.

Quanto à geração de hidrogramas sintéticos, não foi possível escolher um modelo que fosse capaz de estimar adequadamente os 3 componentes do hidrograma avaliados, simultaneamente. Portanto, recomenda-se que essa escolha seja pautada em função do parâmetro de interesse no estudo hidrológico. Se o maior interesse é a vazão de pico, os modelos de Clark e Santa Bárbara mostraram melhor desempenho. Considerando vazão de pico e forma do hidrograma sintético, caracterizada através dos tempos de pico e de base, o modelo de Santa Bárbara mostra-se ligeiramente superior.

Durante a execução do trabalho, a principal dificuldade encontrada no uso do ABC6 foi a ausência de um manual claro e conciso, contendo informações sobre as rotinas de cálculo dos modelos e de seus parâmetros. Portanto, recomenda-se o uso deste trabalho, das referências consultadas e dos resultados obtidos como material de apoio, norteados o usuário do ABC6 quanto aos limites de uso e aplicação dos diversos modelos e seus parâmetros, sobretudo em áreas urbanas.

Ressalta-se que os resultados encontrados não permitem uma generalização indiscriminada dos parâmetros e dos modelos para diferentes áreas, visto as peculiaridades da bacia do Mineirinho, dos próprios modelos hidrológicos avaliados, das rotinas de cálculo do SSD ABC6 e das condições investigadas. Contudo, servem como um alerta sobre a validade dos modelos testados. Recomenda-se, portanto, verificar a adequabilidade dos modelos e a disponibilidade de parâmetros específicos para a área de estudo, visando representar melhor os processos hidrológicos e evitar o uso pouco criterioso destes e de seus parâmetros.

A partir dos dados hidrológicos disponíveis e dos resultados obtidos, sugere-se a execução de estudos futuros que busquem:

- Expandir a rede de monitoramento hidrológico da cidade de São Carlos, permitindo a aquisição de dados hidrológicos nos demais córregos urbanos que entremeiam a cidade;
- Parametrizar a bacia do Mineirinho ou de outras áreas urbanas de São Carlos (SP) a partir de levantamentos de campo, visando comparar os resultados obtidos com os valores sugeridos em literatura técnica;
- Calibrar os parâmetros de cada modelo, permitindo avaliá-los e, conseqüentemente, auxiliar a compreensão do processo de transformação chuva-vazão na bacia do Mineirinho e nas demais áreas urbanas de São Carlos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Prefeitura pretende reparar prejuízos financeiros causados pelo temporal em lojas, casas e veículos. **São Carlos Agora**, São Carlos, 23 out. 2013. Disponível em: <<http://www.saocarlosagora.com.br/cidade/noticia/2013/10/23/47747/prefeitura-pretende-reparar-prejuizos-financeiros-causados-pelo-temporal-em-lojas-casas-e-veiculos/>>.

AHMAD, S.; SIMONOVIC, S. P. **An intelligent decision support system for management of floods**. *Water Resources Management*, v. 20, n. 3, p. 391–410, 2006.

ANGELINI SOBRINHA, L. *et al.* Challenges of the hydrological monitoring of small hydrographic basins: Case of study of the Mineirinho stream basin, São Carlos (SP – Brazil). In: 6th International Conference on Flood Management, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: 2014.

AKAN, A. O. **Urban Stormwater hydrology: a guide to engineering calculations**. Lancaster: Technomic Publishing Company, 1993.

ALMEIDA, T. L. **Implicações ambientais dos processos de atenuação de lixiviado em locais de disposição de resíduos sólidos urbanos**. 2009. 192p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Glossário de Termos Hidrológicos**. Brasília, DF, 2001.

_____. **Gestão da Rede Hidrometeorológica**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/institucional/SobreaAna/hidroweb.aspx>>. Acesso em: 9 fev. 2015.

APRÍGIO, P. O. **Avaliação de modelos de simulação de cargas difusas em bacias urbanas**. 2012. 113p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

BENINI, R. M. **Cenários de ocupação urbana e seus impactos no ciclo hidrológico na bacia do córrego do Mineirinho**. 2005. 122p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

BRAGA, B.; BARBOSA, P. S. F.; NAKAYAMA, P. T. **Sistemas de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, n. Jul/Set, p. 73–95, 1998.

BRANDÃO, J. L. B.; BARROS, M. T. L. Determinação de áreas de inundação para uma bacia urbana. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007. **Anais...** Vitória: 2007.

BRASIL. Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margens de Rios** / CARVALHO, C.S.; MACEDO, E.S.de; OGURA, A.T. (Org.). Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. Estados Unidos da América: McGrawl – Hill, 1988.

CLARKE, R. T.; SILVA DIAS, P. L. **As Necessidades de Observação e Monitoramento dos Ambientes Brasileiros quanto aos Recursos Hídricos**. Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Recursos Hídricos, 2002.

D'ASARO, F.; GRILLONE, G.; HAWKINS, R. H. Curve Number: Empirical Evaluation and Comparison with Curve Number Handbook Tables in Sicily. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.19, n.12, p. 1 - 13, 2014.

DIGITALGLOBE. **Spectral Response for Digital Globe Earth Imaging Instruments**, 2011 Disponível em: <http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/DigitalGlobe_Spectral_Response_0.pdf> Acesso em: 19 de abril 2014.

DOOGE, J. C. I. **Linear theory of hydrologic systems**. Washington: USDA - United States Department of Agriculture, 1973.

EM-DAT. **The OFDA/CRED International Disaster Database**. Brussels: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters; Université Catholique de Louvain, 2012. Disponível em: <<http://www.emdat.be>>. Acesso em: 22 dez. 2014.

FANG, X.; THOMPSON, *et al.* Time of Concentration Estimated Using Watershed Parameters Determined by Automated and Manual Methods. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 134, n. April, p. 202–211, 2008.

FRANCO, E. J. **Dimensionamento de bacias de retenção das águas pluviais com base no método racional**. 2004. 155p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

HAAN, C. T. **Design hydrology and sedimentology for small catchments**. 1ª ed. London: Academic Press Limited, 1994.

HADDAD, E. A.; TEIXEIRA, E. Economic Impacts of Natural Disasters in Megacities: The case of floods in São Paulo, Brazil. **Nereus - Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo**, p. 1 - 21, 2013.

HAWKINS, R. H.; KHOJEINI, A. V. Initial Abstraction and Loss in the Curve Number method. In: Proceedings Arizona Hydrological Society, Arizona. **Proceedings...** Arizona: 2000.

HAWKINS, R. H. *et al.* **Curve number hydrology: State of the Practice**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2008.

HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E. **Storm water management model, version 4 : user's manual**. 4ª ed. Athens, Georgia: U.S. Environmental Protection Agency, 1988.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. 219 p. Disponível em: <http://goo.gl/ZNsWPP>. Acesso em: 21 de abril de 2014.

JIANG, R. **Investigation of runoff curve number initial abstraction ratio**. 2001. University of Arizona, 2001. 120p. Thesis (Master of Science) – School of Renewable Natural Resources, Tucson, Arizona, University of Arizona, 2001.

JÚNIOR, J. E. F. F.; BOTELHO, R. G. M. Análise comparativa do tempo de concentração: Um estudo de caso na bacia do Rio Cônego, Município de Nova Friburgo, RJ. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, **Anais...** Maceió: 2011.

KUTNER, A. S.; CONTE, A. E.; NITTA, T. Análise Geológica e Caracterização dos Solos para Avaliação do Coeficiente de Escoamento Superficial. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, **Anais...** Aracaju: 2001.

LOMBARDI NETO, F.; *et al.* Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços. In: Simpósio sobre terraceamento agrícola, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1989.

BURCHALES, L. G. E. ; SILVA, S. M. C. P. Avaliação do volume de água pluvial drenado em um empreendimento habitacional: estudo de caso em Londrina - PR. **Ambiente Construído - Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, v. 7, n. 2, p. 45–57, 2007.

MCCUEN, R. H.; WONG, S. L.; RAWLS, W. J. Estimating Urban Time of Concentration. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 110, n. 7, p. 887–904, jul. 1984.

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

NAKAYAMA, P. T. *et al.* Avaliação do parâmetro CN do Método do Soil Conservation Service (SCS) nas Bacias do Ribeirão dos Marins e Córrego Bussocaba - Estado de São Paulo. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, **Anais...** Maceió: 2011.

OLIVEIRA, C. P. M. **Plataforma de análise e simulação hidrológica – PLASH**. 2012. 180 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

OLIVEIRA, C. P. M. *et al.* ABC6, Um Sistema de Suporte a Decisões para Análise de Cheias em Bacias Complexas. In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 18, **Anais...** Belo Horizonte: 1999.

PAULINO, P. F. **Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método SCS na determinação de hidrogramas de cheia em bacias urbanas**. 2014. 131p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

PEREIRA, M.; KAYSER, R. B.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo Hidrológico para Grandes Bacias MGB - IPH e Sistemas de Informação Geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 9, n. 2, p. 21–33, 2012.

PILGRIM, D. H.; CORDEVY, I. Flood Runoff. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1992. p. 9.1–9.42.

PINHEIRO, M. C. **Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração**. Porto Alegre - RS: ABRH, 2011.

PINTO, L. L. C. A.; MARTINS, J. R. S. Proposta de metodologia para a análise dos efeitos do emprego de reservatórios de detenção sob a ótica do conceito de impacto zero. **4º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável**, p. 1–12, 2010.

PITT, R.; LANTRIP, J.; O'CONNOR, T. P. Infiltration Through Disturbed Urban Soils. In: Building Partnerships, 1, Reston, VA. **Proceedings...** Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 11 set. 2000.

PMSC – Prefeitura Municipal de São Carlos. Secretaria Municipal de Obras. SHS Consultoria e Projetos de Engenharia S/S Ltda. **Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável**. São Carlos: 2011. 213 p.

PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo. **Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais**. São Paulo, 2012. V.2: Aspectos Tecnológicos: Fundamentos.

PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 1, n. 1, p. 11–19, jan. 1996.

PONTREMOLÉZ, N. S. **Estudo das inundações em cenários alternativos de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho em São Carlos, SP**. 2013. 131p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

PORTO, R. L. L. Escoamento superficial direto. In: BARROS, M.T.; PORTO, R.L.; TUCCI, C.E.M. (Organizadores). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, 1995. Cap. 4, p. 107-165.

PORTO, R. L. L.; AZEVEDO, L. G. T. Sistemas de Suporte a Decisão Aplicados a Problemas de Recursos Hídricos. In: PORTO, R. L. L. (Ed.). **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2. ed. Porto Alegre - RS: ABRH, 2002. Cap. 2, p. 43–95.

SABOL, G. V. Clark Unit Hydrograph and R-Parameter Estimation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 114, n. 1, p. 103–111, jan. 1988.

SANTANA, J. L. S.; AGUIAR NETTO, A. O.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. Impacto da precipitação e de vazão máximas em obras de infra-estrutura em uma sub-bacia do semi-árido de Sergipe. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, n. 79, p. 1–15, **Anais...** São Paulo: 2007.

SANTOS, V. D.; ASSIS, D. C. A.; SILVA, T. C. Drenagem Urbana de Áreas Especiais: O caso da bacia endorreica da Lagoa do Buracão em João Pessoa - Paraíba. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, n. 79, p. 1–20, **Anais...** São Paulo: 2007.

SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; LOMBARDI NETO, F. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 19–29, 2005.

SHARIFI, S.; HOSSEINI, S. M. Methodology for Identifying the Best Equations for Estimating the Time of Concentration of Watersheds in a Particular Region. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 137, n. November, p. 712–719, 2011.

SHOURIAN, M.; MOUSAVI, S. J.; TAHERSHAMSI, A. Basin-wide Water Resources Planning by Integrating PSO Algorithm and MODSIM. **Water Resources Management**, v. 22, n. 10, p. 1347–1366, 28 dez. 2007.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, p. 5–23, mar. 2005

SILVEIRA, G. M. **Análise de sensibilidade de hidrogramas de projeto aos parâmetros de sua definição indireta**. 2010. 244p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, São Paulo (SP), Universidade de São Paulo, 2012.

STRAUB, T. D.; MELCHING, C. S.; KOCHER, K. E. **Equations for Estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois**. USDI – United States of Geological Survey, USGS - United States Geological Survey. Urbana, Illinois, 2000.

TOLENTINO, M. **Estudo crítico sobre o clima da região de S.Carlos**. São Carlos: EdUFSCar, 2007.

TOMAZ, P. **Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais**. 1ª ed. São Paulo: Editora Navegar, 2002.

TSIHRINTZIS, V. A.; SIDAN, C. B. Modeling Urban Stormwater Runoff Processes Using the Santa Bárbara Method. **Water Resources Management**, v. 12, p. 139–166, 1998.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

_____. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH, 2001.

TXDOT, Texas Department of Transportation. **Hydraulic Design Manual**. Texas, 2014.

USDA – United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. In: **National Engineering Handbook**. Washington: NRCS, 2004. cap 10.

_____. Time of Concentration. In: **National Engineering Handbook**. Washington: NRCS, 1997. cap 15.

_____. Hydrographs. In: **National Engineering Handbook**. Washington: NRCS, 2007. cap 16.

USDI - United States Department of the Interior. **Water Measurement Manual**. 3. ed. Washington: U.S. Government Printing Office, 2001.

**APÊNDICE A – HIETOGRAMAS E HIDROGRAMAS
OBSERVADOS EM CAMPO**

Figura 13 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 1.

Figura 14 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 2.

Figura 15 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 3.

Figura 16 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 4.

Figura 17 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 5.

Figura 18 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 6.

Figura 19 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 7.

Figura 20 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 8.

Figura 21 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 9.

Figura 22 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 10.

Figura 23 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 11.

Figura 24 - Hietograma e Hidrograma observados no Evento 12.

**APÊNDICE B - MÉTODO DOS POLÍGONOS DE THIESSEN PARA
CADA SITUAÇÃO**

Figura 25 - Representação do Método dos Polígonos de Thiessen para a Situação 1.

Figura 26- Representação do Método dos Polígonos de Thiessen para a Situação 2.

Figura 27 – Representação do Método dos Polígonos de Thiessen para a Situação 3.

**APÊNDICE C – HIDROGRAMAS SINTÉTICOS GERADOS A
PARTIR DO MODELO DO HIDROGRAMA TRIANGULAR DO SCS**

Figura 28 – Evento 1 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.

Figura 29 – Evento 2 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.

Figura 30 - Evento 3 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.

Figura 31 - Evento 4 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.

Figura 32 - Evento 5 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.

Figura 33 - Evento 6 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.

Figura 34 - Evento 7 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.

Figura 35 - Evento 8 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.

Figura 36 - Evento 9 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.

Figura 37 - Evento 10 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.

Figura 38 - Evento 11 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.

Figura 39 - Evento 12 simulado pelo modelo do Hidrograma Triangular do SCS.

**APÊNDICE D – HIDROGRAMAS SINTÉTICOS GERADOS A
PARTIR DO MODELO DE CLARK – CONSTANTE DE SABOL**

Figura 40 - Evento 1 simulado pelo modelo de Clark – K_{Cl} Sabol.

Figura 41 - Evento 2 simulado pelo modelo de Clark – K_{Cl} Sabol.

Figura 42 - Evento 3 simulado pelo modelo de Clark – K_{Cl} Sabol.

Figura 43 - Evento 4 simulado pelo modelo de Clark – K_{Cl} Sabol.

Figura 44 - Evento 5 simulado pelo modelo de Clark – K_{Cl} Sabol.

Figura 45 - Evento 6 simulado pelo modelo de Clark – K_{Cl} Sabol.

Figura 46 - Evento 7 simulado pelo modelo de Clark – K_{Cl} Sabol.

Figura 47 - Evento 8 simulado pelo modelo de Clark – K_{Cl} Sabol.

Figura 48 - Evento 9 simulado pelo modelo de Clark – K_{Cl} Sabol.

Figura 49 - Evento 10 simulado pelo modelo de Clark – K_{Cl} Sabol.

Figura 50 - Evento 11 simulado pelo modelo de Clark – K_{Cl} Sabol.

Figura 51 - Evento 12 simulado pelo modelo de Clark – K_{Cl} Sabol.

**APÊNDICE E – HIDROGRAMAS SINTÉTICOS GERADOS A
PARTIR DO MODELO DE SANTA BÁRBARA**

Figura 52 - Evento 1 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.

Figura 53 - Evento 2 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.

Figura 54 - Evento 3 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.

Figura 55 - Evento 4 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.

Figura 56 - Evento 5 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.

Figura 57 - Evento 6 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.

Figura 58 - Evento 7 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.

Figura 59 - Evento 8 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.

Figura 60 - Evento 9 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.

Figura 61 - Evento 10 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.

Figura 62 - Evento 11 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.

Figura 63 - Evento 12 simulado pelo modelo de Santa Bárbara.

**ANEXO – 1: VALORES DE CN PARA DIFERENTES TIPOS DE USO
DO SOLO (USDA, 2004)**

Tabela 40 - Valores de CN para áreas urbanas.

Cover description	Average percent impervious area ¹	CN for hydrologic soil group			
		A	B	C	D
Fully developed urban areas (vegetation established)					
Open space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.)					
Poor condition (grass cover < 50%)		68	79	86	89
Fair condition (grass cover 50% to 75%)		49	69	79	84
Good condition (grass cover > 75%)		39	61	74	80
Impervious areas:					
Paved parking lots, roofs , driveways, etc. (excluding right-of-way).		98	98	98	98
Streets and roads:					
Paved; curbs and storm sewers (excluding right-of-way)		98	98	98	98
Paved; open ditches (including right-of-way)		83	89	92	93
Gravel (including right-of-way)		76	85	89	91
Dirt (including right-of-way)		72	82	87	89
Western desert urban areas:					
Natural desert landscaping (pervious areas only)		63	77	85	88
Artificial desert landscaping (impervious weed barrier, desert shrub with 1- to 2-inch sand or gravel mulch and basin borders)		96	96	96	96
Urban districts:					
Commercial and business	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93
Residential districts by average lot size:					
1/8 acre or less (town houses)	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
2 acres	12	46	65	77	82
Developing urban areas					
Newly graded areas (pervious areas only no vegetation)		77	86	91	94

¹ The average percent impervious area shown was used to develop the composite CN's. Other assumptions are as follows: impervious areas are directly connected to the drainage system, impervious areas have a CN of 98, and pervious areas are considered equivalent to open space in good hydrologic condition.

Tabela 41 - Valores de CN para áreas agrícolas.

Cover description			CN for hydrologic soil group			
Cover type	Treatment ²	Hydrologic condition ³	A	B	C	D
Fallow	Bare soil	-	77	86	91	94
	Crop residue cover (CR)	Poor	76	85	90	93
		Good	74	83	88	90
Row Crops	Straight rows (SR)	Poor	72	81	88	91
		Good	67	78	85	89
	SR + CR	Poor	71	80	87	90
		Good	64	75	82	85
	Contoured (C)	Poor	70	79	84	88
		Good	65	75	82	86
	C + CR	Poor	69	78	83	87
		Good	64	74	81	85
	Countered & Terraced (C & T)	Poor	66	74	80	82
		Good	62	71	78	81
	C & T + CR	Poor	65	73	79	81
		Good	61	70	77	80
Small Grain	SR	Poor	65	76	84	88
		Good	63	75	83	87
	SR + CR	Poor	64	75	83	86
		Good	60	72	80	84
	C	Poor	63	74	82	85
		Good	61	73	81	84
	C + CR	Poor	62	73	81	84
		Good	60	72	80	83
	C & T	Poor	61	72	79	82
		Good	59	70	78	81
	C & T + CR	Poor	60	71	78	81
		Good	58	69	77	80
Close-seeded or broadcast legumes or rotation meadow	SR	Poor	66	77	85	89
		Good	58	72	81	85
	C	Poor	64	75	83	85
		Good	55	69	78	83
	C & T	Poor	63	73	80	83
		Good	51	67	76	80

² Crop residues apply only if residue is on at least 5% of the surface throughout the year.

³ Hydrologic condition is based on combination factors that affect infiltration and runoff, including (a) density and canopy of vegetative areas, (b) amount of round cover, (c) amount of grass or close-seeded legumes, (d) percent of residue cover on the land surface (good $\geq 20\%$) and (e) degree of surface roughness.

Poor: Factors impair infiltration and tend to increase runoff. Good: Factors encourage average and better than average infiltration and tend to decrease runoff.

Tabela 42 - Valores de CN para outros tipos de áreas agrícolas.

Cover description		CN for hydrologic soil group			
Cover type	Hydrologic condition	A	B	C	D
Pasture, grassland, or range continuous forage for grazing. ⁴	Poor	68	79	86	89
	Fair	49	69	79	84
	Good	39	61	74	80
Meadow - continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay.	-	30 ⁵	58	71	78
Brush - brush-weed-grass mixture with brush the major element. ⁶	Poor	48	67	77	83
	Fair	35	56	70	77
	Good	30	48	65	73
Woods - grass combination (orchard or tree farm). ⁷	Poor	57	73	82	86
	Fair	43	65	76	82
	Good	32	58	72	79
Woods. ⁸	Poor	45	66	77	83
	Fair	36	60	73	79
	Good	30	55	70	77
Farmsteads - buildings, lanes, driveways, and surrounding lots.	-	59	74	82	86

⁴ Poor: < 50% ground cover or heavily grazed with no mulch. Fair: 50 to 75% ground cover and not heavily grazed. Good: > 75% ground cover and lightly or only occasionally grazed.

⁵ Actual curve number is less than 30; use CN equal 30 for runoff computations

⁶ Poor: < 50% ground cover. Fair: 50 to 75% ground cover. Good: > 75% ground cover.

⁷ CN's shown were computed for areas with 50% woods and 50% grass (pasture) cover. Other combinations of conditions may be compute from the CN's for woods and pasture.

⁸ Poor: Forest litter, small trees, and brush are destroyed by heavily grazing or regular burning. Fair: Woods are grazed but not burned, and some forest litter covers the soil. Good: Woods are protected from grazing, and litter and brush adequately cover the soil.