PALOMA FERNANDES PAULINO

Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método SCS na determinação de
hidrogramas de cheia em bacias urbanas

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos - SP

2014

PALOMA FERNANDES PAULINO

Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método SCS na determinação de
hidrogramas de cheia em bacias urbanas

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

São Carlos - SP

2014

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.

P328e Paulino, Paloma Fernandes
Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do
método SCS na determinação de hidrogramas de cheia em
bacias urbanas / Paloma Fernandes Paulino; orientador
João Luiz Boccia Brandão. São Carlos, 2014.

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, 2014.

1. Método SCS. 2. Uso e ocupação do solo. 3. Tempo
de concentração. 4. Chuvas de projeto. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **PALOMA FERNANDES PAULINO**.

Título da dissertação: "Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método scs na determinação de hidrogramas de cheia em bacias urbanas".

Data da defesa: 30/09/2014

Comissão Julgadora:

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

Prof. Titular **Swami Marcondes Villela**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Profa. Dra. **Liliane Lazzari Albertin**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Ilha Solteira)

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**

Resultado:

aprovado

aprovado

aprovado

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir inicializar e concluir esse trabalho e por estar sempre presente em minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Luiz Boccia Brandão pela atenção, dedicação e exemplo de excelente conduta e profissionalismo.

À Fundação CAPES – pela bolsa concedida.

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

Ao pessoal do laboratório LABSIN, pelo apoio e amizade.

À minha família, meus pais Vilson e Ana, e meu irmão Cleiton, por tudo que me ensinaram e continuam ensinando e pelo amor e companheirismo incondicional.

Ao meu namorado Vitor, pelo amor, amizade e companheirismo, principalmente durante o desenvolvimento desse trabalho, que me ajudaram a tornar os momentos difíceis e de cansaço em momentos de superação.

Ao pessoal da empresa SHS Consultoria e Projetos de Engenharia, pois me deram muita força e incentivo para desenvolver esse trabalho, principalmente à Livia Villela e Prof. Swami Marcondes Villela por terem revisado o texto.

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

RESUMO

PAULINO, P. F. **Estudo sobre a Sensibilidade dos Parâmetros do Método SCS na Determinação de Hidrogramas de Cheia em Bacia Urbanas.** Dissertação [Mestrado em Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento)] - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Para simular o comportamento da bacia hidrográfica diante de eventos chuvosos e, a partir da quantificação das vazões de cheias, encontrar soluções para os problemas causados pelas enchentes, é essencial a utilização de modelos de transformação chuva-vazão. Há diferentes métodos para o cálculo do deflúvio superficial ou precipitação excedente para uma dada bacia hidrográfica. Entre estes, um dos mais utilizados pela comunidade técnica é o método desenvolvido pelo Departamento de Conservação do Solo norte-americano: SCS (*Soil Conservation Service*, atual *National Resources Conservation Service*), aplicável principalmente quando não se dispõe de séries históricas de dados hidrológicos. A utilização deste método depende da seleção do parâmetro CN (*Curve Number*), que por sua vez requer o conhecimento das características da bacia hidrográfica em estudo, como: tipos de solo, cobertura vegetal, uso da terra, teor de umidade do solo anterior à chuva. A partir da precipitação excedente total do evento chuvoso, para se construir um hidrograma de cheia, é necessário distribuir a chuva ao longo do tempo, ou seja, construir o hietograma da precipitação excedente. O SCS também propõe um método baseado no hidrograma unitário triangular sintético para gerar o hidrograma de cheia a partir de um certo hietograma. O parâmetro básico para se obter esse hidrograma sintético é o tempo de concentração da bacia hidrográfica (t_c). Para a determinação deste parâmetro existem diversas fórmulas empíricas baseadas nas características físicas da bacia hidrográfica, uma vez que a sua determinação numa bacia sem dados hidrométricos torna-se impossível. Deste modo, para uma estimativa coerente do t_c , é necessário avaliar para cada caso a ser estudado a fórmula mais adequada e os dados disponíveis. Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo analisar a sensibilidade do método SCS em relação à classificação do uso e ocupação do solo e ao tempo de concentração, a partir de aplicação deste para a bacia do córrego do Mineirinho situada em São Carlos, SP. A análise da sensibilidade em relação ao CN foi realizada através da comparação dos resultados produzidos utilizando-se mapas de classificação dos usos do solo, produzidos a partir de imagens de satélite de alta resolução, as quais não são disponibilizadas gratuitamente, e imagens gratuitas de baixa resolução. Em relação ao tempo de concentração, foram analisadas e comparadas as diversas fórmulas disponíveis para sua determinação para uma bacia urbana. Outro aspecto estudado foi a distribuição temporal da chuva crítica. Existem diversos métodos indicados na literatura, como o dos blocos alternados, Huff e *Bureau of Reclamation*. Analisou-se o efeito que cada método produz nos hidrogramas de cheia resultantes. O método SCS apresenta-se bastante sensível em relação aos três parâmetros analisados. As diferenças entre os valores de CN, obtidos a partir das imagens de alta e baixa resolução, foram as que resultaram em maiores diferenças nas vazões de pico. A imagem de baixa resolução tende a subestimar as vazões de pico. Os métodos de distribuição temporal da chuva como Blocos Alternados e Huff 2°. Quartil, apesar serem métodos diferentes, produziram resultados semelhantes.

Palavras-chave: método SCS, uso e ocupação do solo, tempo de concentração, chuvas de projeto.

ABSTRACT

PAULINO, P. F. **Study on the SCS Method Parameter Sensitivity in Determination of flood hydrographs in Urban Basin.** Dissertation (MSc degree in Hydraulic and Sanitary Engineering) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

To simulate the behavior of the basin before rain events and, from the quantification of flow of floods, find solutions to the problems caused by flooding, it is essential the use of models of processing rain-flow. There are different methods for calculating the surface runoff or excess rainfall for a given basin. Among these, one of the most used by technical community is the method developed by the Department of Soil Conservation American: SCS (Soil Conservation Service, current National Resources Conservation Service), mainly applicable when there is no historical series of data hydrological. The use of this method is dependent on the selection of the parameter CN (Curve Number), which in turn requires the knowledge of the characteristics of the basin under study, such as: soil types, vegetation cover, land use, soil moisture content prior to the rain. From the total surplus precipitation of rain event, in order to build a hydrograph, it is necessary to distribute the rain over time, i.e. build the hyetogram of excess rainfall. The SCS also proposes a method based on unit hydrograph triangular synthetic. The basic parameter to obtain this synthetic hydrograph is the time of concentration of the basin (t_c). For the determination of this parameter there are several empirical formulas based on the physical characteristics of the basin, since its determination in a basin without hydrometrical data becomes impossible. Thus, for a consistent estimate of t_c , it is necessary to evaluate the most suitable formula and the data available for each case to be considered. In this sense, the aim of the present study is to analyze the sensitivity of the SCS method in relation to the classification of the use and occupation of the soil and the time of concentration, from application of this model to the basin of the Mineirinho located in São Carlos, SP. The sensitivity analysis in relation to the CN was performed through the comparison of the results produced using maps of classification of soil uses, produced from high-resolution satellite images, which are not made available for free, and free images of low resolution. In relation to the time of concentration, the various formulas available were analyzed and compared for its determination to an urban basin. Another aspect studied, was the temporal distribution of critical rainfall. There are several methods given in the literature, such as the Alternating Block, Huff and Bureau of Reclamation. This study aimed to analyze the effect each method produces in the resulting flood hydrographs. The SCS method is quite sensitive in relation to the three parameters analyzed. The differences between the values of CN, obtained from the images of high and low resolution, were the ones that resulted in greater differences in flow of peak. The low resolution image tends to underestimate the flow of peak. The methods of temporal distribution of rainfall as Alternating Block and Huff 2°. Quartil, despite being different methods, produced similar results.

Keywords: SCS method, use and occupation of the land, time of concentration, critical rainfall.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – 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.....	30
Figura 2 – Parâmetros de um hidrograma	40
Figura 3 – Hidrograma Unitário Triangular	41
Figura 4 – Distribuições temporais de chuvas do primeiro quartil.....	51
Figura 5 – Distribuições temporais de chuvas do segundo quartil	52
Figura 6 – Distribuições temporais de chuvas do terceiro quartil	52
Figura 7 – Distribuições temporais de chuvas do quarto quartil	53
Figura 8 – Localização Geográfica da Área de Estudo	62
Figura 9 – Sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Córrego do Mineirinho.....	66
Figura 10 – Plataforma do <i>software Definiens</i> com a imagem de alta resolução, sub-bacia 1	69
Figura 11 – Plataforma do <i>software Definiens</i> com a imagem de baixa resolução, sub-bacia 1	70
Figura 12 – Mapa de uso e ocupação do solo elaborado a partir de imagem de alta resolução	72
Figura 13 – Mapa de uso e ocupação do solo elaborado a partir de imagem de baixa resolução	73
Figura 14 – Editor dos componentes do método SCS no HEC-HMS	82
Figura 15 – Editor dos componentes do método SCS no HEC-HMS	82
Figura 16 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações a partir dos CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, para período de retorno de 100 anos	85
Figura 17 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações a partir dos CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, para período de retorno de 50 anos	86
Figura 18 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações a partir dos CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, para período de retorno de 25 anos	87
Figura 19 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações a partir dos CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, para período de retorno de 5 anos	88

Figura 20 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil e Huff 2°. Quartil e Bureau of Reclamation, para período de retorno igual a 100 anos	92
Figura 21 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil e Huff 2°. Quartil e Bureau of Reclamation, para período de retorno igual a 50 anos	94
Figura 22 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil e Huff 2°. Quartil e Bureau of Reclamation, para período de retorno igual a 25 anos	96
Figura 23 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil e Huff 2°. Quartil e Bureau of Reclamation, para período de retorno igual a 5 anos	98
Figura 24 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 100 anos.....	100
Figura 25 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 50 anos	101
Figura 26 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 25 anos	102
Figura 27 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 5 anos	103
Figura 28 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 100 anos – Blocos Alternados – Duração da chuva igual a 65 minutos	119
Figura 29 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 50 anos – Blocos Alternados – Duração da chuva igual a 65 minutos	119
Figura 30 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 25 anos – Blocos Alternados – Duração da chuva igual a 65 minutos	120
Figura 31 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 5 anos – Blocos Alternados – Duração da chuva igual a 65 minutos	120
Figura 32 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 100 anos – Huff 1°. Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos	121

Figura 33 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 50 anos – Huff 1°.	
Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos	121
Figura 34 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 25 anos – Huff 1°.	
Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos	122
Figura 35 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 5 anos – Huff 1°.	
Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos	122
Figura 36 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 100 anos – Huff 2°.	
Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos	123
Figura 37 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 50 anos – Huff 2°.	
Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos	123
Figura 38 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 25 anos – Huff 2°.	
Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos	124
Figura 39 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 5 anos – Huff 2°.	
Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos	124
Figura 40 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 100 anos – Bureau of Reclamation – Duração da chuva igual a 65 minutos	125
Figura 41 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 50 anos – Bureau of Reclamation – Duração da chuva igual a 65 minutos	125
Figura 42 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 25 anos – Bureau of Reclamation – Duração da chuva igual a 65 minutos	126
Figura 43 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 5 anos – Bureau of Reclamation – Duração da chuva igual a 65 minutos	126

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Municípios, total e com inundações e/ou alagamentos ocorridos na área urbana, nos cinco anos anteriores à PNSB - 2008, por fatores agravantes das inundações e/ou alagamentos, segundo as Grandes Regiões do país.	29
Quadro 2 – Classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras (continua)	37
Quadro 3 – Relação entre a duração da chuva e o quartil que melhor representa o fenômeno	53
Quadro 4 – Resultados dos estudos realizados sobre fórmulas para cálculo de tempo de concentração	56
Quadro 5 – Valores de segmentação utilizados em cada sub-bacia do córrego do Mineirinho	68
Quadro 6 – Áreas das sub-bacias e da bacia do córrego do Mineirinho	75
Quadro 7 – Comprimentos dos talvegues *	75
Quadro 8 – Comprimentos dos canais principais*	75
Quadro 9 – Declividades equivalentes dos talvegues.....	76
Quadro 10 – Declividades médias dos canais principais.....	76
Quadro 11 – Valores de CN para as classes de uso e ocupação do solo das imagens de alta e baixa resolução	78
Quadro 12 – Fórmulas de Tempo de Concentração recomendadas por Silveira.....	79
Quadro 13 – Tempos de Concentração da Bacia do Mineirinho calculados a partir das fórmulas de Carter e Kirpich	80
Quadro 14 – Resultados das simulações realizadas utilizando CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, com período de retorno igual a 100 anos	85
Quadro 15 – Resultados das simulações realizadas utilizando CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, com período de retorno igual a 50 anos	86
Quadro 16 – Resultados das simulações realizadas utilizando CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, com período de retorno igual a 25 anos	87
Quadro 17 – Resultados das simulações realizadas utilizando CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, com período de retorno igual a 5 anos	88
Quadro 18 – Comparação dos volumes dos hidrogramas no exutório da bacia resultantes das simulações utilizando CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, para período os diferentes períodos de retorno	89
Quadro 19 – Comparação dos resultados das simulações realizadas utilizando CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, para período de retorno igual a 5 anos.....	90

Quadro 20 – Resultados das simulações realizadas utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil e Huff 2°. Quartil e <i>Bureau of Reclamation</i> , para período de retorno igual a 100 anos.....	91
Quadro 21 – Resultados das simulações realizadas utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil e Huff 2°. Quartil e <i>Bureau of Reclamation</i> , para período de retorno igual a 50 anos.....	93
Quadro 22 – Resultados das simulações realizadas utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil e Huff 2°. Quartil e <i>Bureau of Reclamation</i> , para período de retorno igual a 25 anos.....	95
Quadro 23 – Resultados das simulações realizadas utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil e Huff 2°. Quartil e <i>Bureau of Reclamation</i> , para período de retorno igual a 5 anos.....	97
Quadro 24 – Resultados das simulações realizadas utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 100 anos.....	100
Quadro 25 – Resultados das simulações realizadas utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 50 anos.....	101
Quadro 26 – Resultados das simulações realizadas utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 25 anos.....	102
Quadro 27 – Resultados das simulações realizadas utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 5 anos.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de CN para áreas urbanas	115
Tabela 2 – Valores de CN para áreas agrícolas	116
Tabela 3 – Valores de CN para outros tipos de áreas agrícolas	117
Tabela 4 – Valores de CN para regiões áridas e semiáridas.....	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANN	<i>Artificial Neural Networks</i>
CDCC	Centro de Divulgação Científica e Cultural
CN	<i>Curve Number</i>
DAEE	Departamento de Água e Energia Elétrica
ESD	Escoamento Superficial Direto
EUA	Estados Unidos de América
HUT	Hidrograma Unitário Triangular
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ILWIS	<i>Integrated Land and Water Information System</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LULC	<i>Land Use/Cover</i>
NEH	<i>National Engineering Handbook</i>
NRCS	<i>Natural Resources Conservation Service</i>
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SIG	Sistema de Informações Geográficas
UGRHI	Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
VESD	Volume do Escoamento Superficial Direto

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área da bacia
D	duração da chuva unitária
Δh	diferença entre as cotas da nascente e do exutório da bacia
Δh_i	extensão de cada trecho
h	horas
ha	hectares
Ia	perdas iniciais
km ²	quilômetros quadrados
L	comprimento do talvegue
L _c	comprimento do canal
Li	extensão horizontal em cada trecho do talvegue
m ³ .s-1	metros cúbicos por segundo
min	minutos
P	altura precipitada
Q	altura da lâmina d'água escoada
q _p	vazão de pico
S	índice de armazenamento d'água no solo da bacia
S _c	declividade do canal
S_i	declividade média do talvegue, em m/m;
s_i	declividade média em cada trecho do talvegue
S_{ie}	declividade equivalente do talvegue, em m/m;
t	duração da chuva de projeto
t _a	tempo de ascensão
t _b	duração total do escoamento superficial direto
t _b	tempo de base
t _c	tempo de concentração
t _p	tempo de pico
t _r [*]	tempo de recessão
T _r	período de retorno
t _r	tempo de retardo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	25
2. OBJETIVOS	27
2.1 Objetivo geral	27
2.2 Objetivos específicos	27
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
3.1 Inundações no Brasil e no município de São Carlos	28
3.2 Determinação de vazões máximas e composição de hidrogramas	31
3.3 Escoamento superficial	32
3.4 Métodos SCS	33
3.4.1 <i>Recomendações de uso</i>	34
3.4.2 <i>Precipitação efetiva</i>	35
3.4.3 <i>Hidrograma Unitário Sintético</i>	39
3.4.4 <i>Aplicações do método</i>	42
3.5 Uso e Ocupação do Solo	44
3.5.1 <i>Imagens de Satélite e Classificação do Uso e Ocupação do Solo</i>	44
3.5.2 <i>Sistema de Informações Geográficas</i>	48
3.6 Chuvas de Projeto	48
3.7 Distribuição Temporal da Chuva	49
3.7.1 <i>Método dos Blocos Alternados</i>	50
3.7.2 <i>Método de Huff</i>	51
3.7.3 <i>Método do Bureau of Reclamation</i>	54
3.8 Tempo de Concentração	54
3.8.1 <i>Fórmula de Carter</i>	57
3.8.2 <i>Fórmula de Schaake</i>	59
3.8.3 <i>Fórmula de Kirpich</i>	60
4. MATERIAL E MÉTODOS	61
4.1 Área de estudo	61
4.2 Base de dados georreferenciados	63
4.3 Sub-bacias	65
4.4 Mapas de uso e ocupação do solo	67
4.5 Parâmetros de entrada do modelo HEC-HMS	74

4.5.1 Área, comprimentos dos talwegues e canais principais e declividades médias e equivalentes	74
4.5.2 Curve Number	76
4.6 Tempo de concentração, chuvas de projeto e distribuição temporal	79
4.6.1 Tempo de concentração.....	79
4.6.2 Determinação das chuvas de projeto	80
4.6.3 Distribuição temporal da chuva.....	81
4.7 Simulação hidrológica e análise de sensibilidade.....	81
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
5.1 Curve Number	84
5.2 Distribuição temporal da chuva.....	90
5.3 Tempo de concentração	99
6. CONCLUSÕES.....	105
7. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
APÊNDICE A – Valores de CN para diferentes tipos de uso do solo (USDA, 1986)	114
ANEXO A – Hietogramas da chuva de projeto	119

1. INTRODUÇÃO

Durante a segunda metade do século XX, o Brasil apresentou um significativo crescimento da população urbana, a qual atualmente, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012), representa 84,90 % da população total do país. Este processo de crescimento urbano acelerado se deu principalmente entre os anos de 1950 e 1990, devido ao processo de industrialização brasileiro, sobrecarregando a infraestrutura urbana, a qual inclui o saneamento básico.

Destaca-se aqui a sobrecarga da infraestrutura de drenagem urbana, pois a maioria dos municípios brasileiros sofre uma série de problemas socioeconômicos e ambientais relacionados às inundações, as quais são provocadas principalmente pela falta de planejamento do espaço urbano e conhecimento dos riscos das áreas sujeitas a este tipo de evento. Com o crescimento urbano desordenado e acelerado, as áreas de várzea foram ocupadas e houve um aumento na magnitude e na frequência das inundações, devido ao excesso de áreas impermeabilizadas. Por essa razão, o volume de água que antes infiltrava, passou a compor o volume que escoava superficialmente, aumentando o volume escoado e as vazões de pico (CANHOLI, 2005).

Para simular o comportamento da bacia hidrográfica diante de eventos chuvosos e, a partir da quantificação das vazões de cheias resultantes do excesso de chuva sobre a bacia, encontrar soluções para os problemas causados pelas inundações, é essencial a definição de um processo de transformação da chuva em deflúvio superficial ou precipitação excedente.

Há diferentes métodos para o cálculo da precipitação excedente e consequente geração do hidrograma de cheia. Entre estes se encontram o método de separação de escoamento e o do hidrograma unitário triangular sintético, desenvolvidos pelo Departamento de Conservação do Solo Norte-americano: os métodos SCS (*Soil Conservation Service*), aplicáveis principalmente quando não se dispõe de séries históricas de dados hidrológicos (PORTO, 1995).

Esse modelo chuva-vazão geral e simples, de fácil aplicação, tem sido usado e estendido para uma variedade de aplicações oportunas. Além disso, apesar de apresentar muitos pontos fracos e de não ter sido feita menção em relação à sua aplicação além dos limites originalmente determinados, seu uso é amplamente difundido, principalmente pela sua facilidade. A utilização desses métodos depende da seleção do CN (*Curve Number*), que por sua vez requer o conhecimento das características da bacia hidrográfica em estudo, como:

tipos de solo, cobertura vegetal, uso do solo e teor de umidade do solo anterior à chuva (HAWKINS et al., 2009).

Para a construção do hidrograma unitário sintético é necessário estimar o tempo de concentração da bacia (t_c). Essa é uma premissa que parte do princípio que o t_c é um dos parâmetros hidrológicos mais utilizados como tempo de resposta da bacia hidrográfica, para transformação da chuva em vazão e composição do hidrograma. Para a determinação deste parâmetro existem diversas fórmulas empíricas, deste modo, para a escolha da fórmula mais adequada, é necessário avaliar cada caso a ser estudado (SILVEIRA, 2005). Valores diferentes encontrados para o t_c influem significativamente nas características dos hidrogramas resultantes.

Além disso, outro aspecto que pode influir no hidrograma de cheia é a distribuição temporal da chuva de projeto. A literatura apresenta algumas formas empíricas para se proceder a essa distribuição, portanto a análise desse procedimento e como ele afeta os resultados é também de grande interesse para se avaliar a sensibilidade dos métodos em questão.

A motivação para este trabalho é justamente avaliar a sensibilidade dos resultados obtidos pela aplicação dos métodos SCS frente aos dados e parâmetros de entrada do modelo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar a sensibilidade dos métodos SCS em relação à classificação do uso e ocupação do solo, ao tempo de concentração e à distribuição temporal da chuva de projeto, a partir da aplicação deste para a bacia do córrego do Mineirinho, São Carlos-SP.

2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos citam-se: classificar o uso e ocupação do solo utilizando imagens de alta resolução, as quais não são disponibilizadas gratuitamente, e imagens gratuitas de baixa resolução, para a determinação do CN e gerar mapas de uso e ocupação do solo; aplicar as fórmulas de tempo de concentração (t_c) para bacias urbanas; analisar as diferenças entre os valores de CN e de tempos de concentração encontrados, em função do tipo de imagem utilizada e fórmula escolhida, respectivamente; estudar as distribuições temporais das chuvas e analisar os resultados obtidos em cada caso; gerar hidrogramas de cheia para os períodos de retorno (T_r) de 5, 25, 50 e 100 anos, analisar os resultados em função dos parâmetros e dados de entrada, gerar conclusões, verificar se as conclusões são alteradas em função do valor de T_r ; gerar recomendações para a comunidade técnica sobre os cuidados a serem tomados quando se aplica o método do SCS.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Inundações no Brasil e no município de São Carlos

As ocorrências de inundações nas cidades brasileiras têm aumentado progressivamente ao longo dos últimos anos, reduzindo a qualidade de vida da população e trazendo prejuízos ao patrimônio público e privado, além de provocarem perdas de vidas e aumento na transmissão de doenças associadas às águas pluviais contaminadas. As raízes desses problemas são principalmente a ausência de planejamento urbano, a urbanização descontrolada, a impermeabilização em larga escala do solo, a ocupação dos fundos de vale e a falta de instrumentos legais de controle na fonte do impacto da impermeabilização do solo (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2013).

A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) - 2008 levantou dados sobre a ocorrência de inundações no país, em um período de cinco anos prévios à sua publicação. Os dados indicam que 2.274 municípios foram atingidos por um ou mais eventos de inundações. A maior proporção de municípios participantes da pesquisa que apresentaram problemas com enchentes e inundações localiza-se nas regiões Sudeste e Sul. Como exemplo, tem-se que, dos 1.668 municípios do Sudeste que participaram da pesquisa, 851 informaram ter sofrido com inundações nos cinco anos anteriores, o que corresponde a aproximadamente 51 % destes. A região Centro-Oeste foi a que apresentou o menor número de municípios com ocorrências de inundações e/ou alagamentos (IBGE, 2010). Mais dados referentes a este levantamento podem ser observados no Quadro 1. É interessante observar que entre os fatores agravantes dos problemas em questão estão:

- Dimensionamento inadequado de projeto;
- Obstrução de bueiros/bocas de lobo, etc.;
- Obras inadequadas;
- Ocupação intensa e desordenada do solo;
- Lençol freático alto;
- Interferências físicas no sistema de drenagem;
- Desmatamento;
- Lançamento inadequado de resíduos sólidos.

Quadro 1 – Municípios, total e com inundações e/ou alagamentos ocorridos na área urbana, nos cinco anos anteriores à PNSB - 2008, por fatores agravantes das inundações e/ou alagamentos, segundo as Grandes Regiões do país.

Grandes Regiões	Municípios										
	Total	Com inundações e/ou alagamentos ocorridos na área urbana, nos últimos cinco anos									
		Total	Fatores agravantes das inundações e/ou alagamentos								
			Dimensionamento inadequado de projeto	Obstrução de bueiros/bocas de lobo, etc.	Obras inadequadas	Ocupação intensa e desordenada do solo	Lençol freático alto	Interferências físicas no sistema de drenagem	Desmatamento	Lançamento inadequado de resíduos sólidos	Outros
Brasil	5564	2274	699	1026	721	980	359	422	485	698	440
Norte	449	150	40	56	45	75	25	24	34	49	39
Nordeste	1793	644	144	222	202	295	112	116	115	195	144
Sudeste	1668	851	291	428	284	386	126	159	227	284	143
Sul	1188	508	189	277	155	181	75	105	84	134	86
Centro-oeste	466	121	35	43	35	43	21	18	25	36	28
Número de ocorrências			1398	2052	1442	1960	718	844	970	1396	880

Fonte: Adaptado de IBGE (2010).

O *dimensionamento inadequado de projeto* e as *obras inadequadas*, somados, foram os agravantes de aproximadamente 24 % das ocorrências de inundações e/ou alagamentos. Isso leva a preocupação em relação aos métodos utilizados para o dimensionamento e construção das estruturas hidráulicas de drenagem e controle de águas pluviais.

No município de São Carlos, a urbanização se deu de forma desordenada, como na maioria dos municípios brasileiros, havendo registros históricos que indicam ocorrências de inundações na região onde foi construído o Mercado Municipal, bacia do córrego do Gregório, desde a década de 40. O mesmo se observa para as regiões próximas ao rio Monjolinho e em outras regiões da cidade, devido principalmente à drenagem ineficiente. A Figura 1 mostra a relação entre o crescimento da área urbanizada e as ocorrências de inundações em São Carlos a partir do ano de 1940 (MENDES; MENDIONDO, 2007).

Figura 1 – 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; MENDIONDO, 2007).

Conforme ilustra a figura anterior, as áreas urbanizadas acumuladas e o número acumulado de ocorrências aumentaram proporcionalmente durante o Estágio I. Nos Estágio II e III, nota-se uma tendência de aproximação da extremidade das duas curvas, o que indica que o número de ocorrências acumulado continua aumentando, enquanto a urbanização já não aumenta com a mesma velocidade.

Vale ressaltar que diversas intervenções, desde 1970, foram realizadas no município com o intuito de resolver os problemas relacionados às inundações, porém até os dias atuais há casos desta natureza. As medidas mitigadoras dos impactos de inundações aplicadas em São Carlos se caracterizaram predominantemente pela aplicação do conceito higienista, por meio da adoção de medidas estruturais intensivas, de caráter pontual e paliativo. Os conceitos de reservação e de prevenção, assim como a aplicação de medidas não estruturais, tiveram pouca expressão no histórico do gerenciamento das águas urbanas da cidade. As medidas aplicadas foram localizadas exclusivamente nos fundos de vale, não considerando a área da bacia como um espaço de atuação para mitigação dos impactos de inundações e alagamentos (MENDES; MENDIONDO, 2007).

3.2 Determinação de vazões máximas e composição de hidrogramas

Segundo Genovez (2001), o estudo de vazões máximas tem extrema importância para a determinação e planejamento de medidas estruturais e não estruturais de controle de enchentes e inundações, a fim de mitigar impactos negativos. Há muita dificuldade para determinação destas vazões com precisão, devido principalmente à ausência de dados observados de vazões e de chuvas intensas para as bacias urbanas de pequeno e médio porte.

No Brasil, é comum encontrar-se um número reduzido de postos hidrométricos em bacias médias ou pequenas e, quando existentes, com séries históricas de curta duração e/ou com muitas falhas. Nos casos em que houver dados de vazão, em quantidade e qualidade adequadas para aplicação dos métodos estatísticos, estes devem ser priorizados, pois eliminam as incertezas inerentes ao processo de transformação da chuva em vazão. Quando estes dados não estão disponíveis, caso mais frequente principalmente para pequenas bacias hidrográficas brasileiras, podem-se utilizar métodos baseados em dados de precipitação. Estes envolvem os seguintes principais passos: cálculo da intensidade da chuva de projeto para um determinado período de retorno, cálculo da chuva média na bacia (distribuição espacial), distribuição temporal da chuva, cálculo da chuva excedente e a transformação da chuva em vazão (GENOVEZ, 2001).

Segundo Lou (2010), o desempenho dos modelos hidrológicos determinísticos do tipo chuva-vazão depende, entre outros fatores, da seleção criteriosa dos parâmetros adotados na

modelagem, respeitada a finalidade e adequada representação dos processos componentes do ciclo hidrológico e das características físicas da bacia em estudo.

3.3 Escoamento superficial

A chuva que atinge a superfície da terra pode escoar, fenômeno chamado de escoamento superficial, formando os cursos d'água (rios, córregos, ribeirões) e lagos, até desaguar no mar, ou infiltrar no solo. Pode também evaporar, o que depende da temperatura do ar e de outras condições, fenômeno que quando associado à transpiração dos seres vivos recebe o nome de evapotranspiração. Entre os componentes do ciclo hidrológico, o escoamento superficial apresenta-se como o mais importante quando se trata dos problemas de drenagem urbana. O volume de água que escoar por unidade de tempo (vazão), quando excede a capacidade das calhas dos cursos d'água ou das unidades do sistema de drenagem existente no local, pode causar grandes estragos e prejuízos financeiros ou até a morte de pessoas e animais.

O escoamento superficial é definido por diversas características das bacias hidrográficas, como: área de drenagem; tipo, uso e ocupação e umidade antecedente do solo; rede de drenagem; forma da bacia; declividade; etc.; o que o torna um dos temas mais complexos da hidrologia. A eficácia e eficiência de um projeto de drenagem urbana dependem de uma análise criteriosa desse fenômeno, que inclui a determinação da vazão de pico e do volume e forma do hidrograma. Erros cometidos nessa fase poderão introduzir incoerências graves no planejamento da bacia e acarretarão obras sub ou superdimensionadas (PORTO, 1995).

O escoamento superficial divide-se em dois componentes: escoamento subterrâneo ou de base e escoamento superficial direto. O primeiro é produzido pelo fluxo de água do aquífero livre e mantém o fluxo de água na bacia durante as estações secas. O segundo é gerado pelo excesso de precipitação. Assim, quando a chuva atinge a superfície do solo uma parte da água infiltra-se, umedecendo-a e abastecendo o lençol freático. A partir do momento em que o solo torna-se saturado, a água passa a escoar pela superfície, o que caracteriza o escoamento superficial direto, conhecido como precipitação efetiva ou deflúvio superficial, cuja determinação condiciona o dimensionamento de obras hidráulicas e outras medidas de controle de inundações.

3.4 Métodos SCS

O método SCS, ou método *Curve Number*, como já mencionado, foi desenvolvido em 1950 pelo *United States Department of Agriculture Soil Conservation Service (USDA SCS)*, atual *Natural Resources Conservation Service (NRCS)*, e desde então tem sido amplamente utilizado para estimar o escoamento superficial direto, a partir de eventos de precipitação. Na mesma época, foi criado, também pelo antigo SCS, o método do Hidrograma Unitário Triangular. Assim, quando utilizados juntamente são chamados de Métodos SCS.

O método é o mais aplicado neste sentido principalmente pela sua simplicidade e fácil aplicação, pois depende basicamente de três variáveis: precipitação, umidade antecedente do solo e do conjunto: tipo e cobertura do solo.

O método foi desenvolvido para atender às necessidades específicas do antigo SCS, para bacias rurais dos Estados Unidos da América - EUA, mas rapidamente foi adaptado para situações diferentes das originais. Novas tabelas com valores de CN (*Curve Number*) foram desenvolvidas, aplicações para ambientes urbanos foram demonstradas e vários modos de aplicação do método foram elucidados e reconhecidos (HAWKINS et al., 2009).

Hawkins et al. (2009) apresentaram o estado atual da prática da metodologia SCS, mas a primeira fonte de referência sobre os métodos é o *National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology (NEH4)*, lançado em 1954 e que passou por muitas atualizações, porém os principais conceitos mantiveram-se inalterados.

A atual versão do NEH4 é o *National Engineering Handbook, Part 630, Hydrology (NEH 630)*, que se encontra dividido em 22 capítulos, de modo que cada um deles foi atualizado em diferentes momentos, os mais atuais são os capítulos: *Preliminary Investigations (2010)*, *Hydrologic Soils Groups (2009)*, *Stage-Inundation Relationships (2007)*, *Stage-Discharge Relationships (2012)*, *Time of Concentration (2010)*, *Hydrographs (2007)*, *Selected Statistical Methods (2012)*, *Transmission Losses (2007)*, *Watershed Yield (2009)* e *Glossary (2012)*. Há ainda extensões para usos urbanos como o TR55 "*Urban Hydrology for Small Watersheds*" publicado em 1986, que alterou as classes de umidade antecedente do solo e incluiu novos valores de CN para usos do solo adicionais (HAWKINS et al., 2009).

Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005) apresentaram e discutiram as classificações hidrológicas do solo propostas por Lombardi Neto, em estudo realizado em 1989, e a original do SCS. Além disso, propuseram uma extensão para a classificação hidrológica do solo,

apresentando sucintamente as principais características das classes de solos em nível de ordem para as unidades representativas dos grandes grupos encontrados no estado de São Paulo. Para analisar a classificação sugerida, os autores comparam os resultados obtidos com os resultados da aplicação da classificação original, para eventos observados na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins, município de Piracicaba, São Paulo, que apresenta área de 21,87 km². Melhores resultados foram obtidos com a classificação hidrológica sugerida por Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005) e com o hidrograma unitário da microbacia. Assim, os resultados indicaram que a classificação hidrológica do solo sugerida por Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005) é mais adequada para as condições dos solos da bacia estudada e que o hidrograma unitário do SCS tende a superestimar a vazão de pico.

3.4.1 Recomendações de uso

Além da sua fácil aplicação, no Brasil, o método SCS é indicado pelo Departamento de Água e Energia Elétrica do estado de São Paulo (DAEE) para o cálculo de vazões máximas e geração de hidrogramas para o dimensionamento de dispositivos hidráulicos sujeitos à outorga, em bacias com áreas superiores a 2 km², quando não há dados históricos fluviométricos. Sendo assim, mesmo que se tenha preferência por outros métodos para a transformação chuva-vazão, é recomendado seguir as diretrizes do órgão outorgante.

Segundo Genovez (2001), os autores: USBR (1977), Wilken (1978), McCuen (1982) e Hjelmfelt e Cassidy (1975) recomendam que o método seja aplicado para bacias com áreas inferiores a 2.600 km², cuja vazão máxima é formada principalmente pelo escoamento superficial direto de precipitações em forma de chuva. Enquanto Ramos (1999), por considerar o método pouco flexível, devido ao fato do hidrograma do SCS utilizar somente um parâmetro dinâmico (t_c), sugere a aplicação do SCS para bacias com áreas entre 3 e 250 km². E para Tomaz (2002), o método deve ser aplicado para a mesma faixa recomendada por Ramos (1999), 3 a 250 km².

3.4.2 Precipitação efetiva

O embasamento físico do método SCS pode ser explicado pela fórmula a seguir.

$$\frac{\text{volume infiltrado}}{\text{capacidade máxima de absorção}} = \frac{\text{precipitação efetiva}}{\text{precipitação total}}$$

Equação 1;

Como ocorrem perdas iniciais nesse processo, que normalmente estão associadas à retenção por depressões do terreno e cobertura vegetal, a equação apresenta-se conforme abaixo.

$$\frac{P - Q - Ia}{S} = \frac{Q}{P - Ia}$$

Equação 2;

Em que:

- Q : altura da lâmina d'água escoada (mm);
- P : altura precipitada (mm);
- S : índice de armazenamento d'água no solo da bacia (mm);
- Ia : perdas iniciais (mm).

Sendo o parâmetro Ia estimado pelos criadores do método em 20 % de S , tem-se o simples equacionamento que relaciona a altura precipitada, P , à altura da lâmina escoada, Q , e o índice de armazenamento d'água na bacia, S , como apresentado pela equação 3, na forma amplamente utilizada na atualidade.

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$$

Equação 3;

A equação é válida quando $P \geq 0,2S$. Caso contrário, $P < 0,2S$, o modelo admite que não ocorre deflúvio superficial, ou seja, $Q=0$.

O índice de armazenamento de água na bacia, S em mm, está relacionado com o CN , conforme a equação a seguir:

$$CN = \frac{25.400}{254 + S}$$

Equação 4;

Em que:

- *CN*: *Curve Number* ou número de deflúvio (adimensional).
- *S*: índice de armazenamento d'água na bacia (mm).

O CN é o parâmetro do método que reflete as condições de uso e ocupação e tipos de solos. É um valor adimensional que pode variar entre 0 e 100. A partir do CN, é possível estimar o máximo potencial de retenção de água de uma determinada área de drenagem em um determinado momento.

A quantidade de chuvas anteriores e consequentes umidades anteriores do solo são bastante significativas para o cálculo das vazões extremas. Dessa maneira, o Método SCS distingue três condições de umidade antecedente do solo:

- Condição I: solos secos - chuvas recentes não ultrapassam 1 mm;
- Condição II: solos umedecidos - chuvas nos últimos cinco dias atingindo um total de até 40 mm. Esta condição é normalmente assumida em projetos de drenagem urbana;
- Condição III: solos úmidos (próximos da saturação) - chuvas nos últimos dias superiores a 40 mm.

A literatura apresenta uma equivalência entre os índices de armazenamento d'água em bacias para três condições de umidade do solo descritas, conforme as relações a seguir. Vale destacar que a relação descrita anteriormente é válida para uma condição intermediária, a condição II. O índice de armazenamento de água "S" das condições I e III relaciona-se com a condição II pelas seguintes equações:

$$S_I = 2,281 \cdot S_{II}$$

Equação 5;

$$S_{III} = 0,427 \cdot S_{II}$$

Equação 6;

Em que:

- S_I : índice de armazenamento para a condição I;
- S_{II} : índice de armazenamento para a condição II;

- S_{III} : índice de armazenamento para a condição III.

Para a classificação hidrológica do solo é necessário conhecer o tipo de solo presente na bacia, o que pode ser feito a partir da análise de mapas pedológicos que contenham a área de estudo ou a partir de testes com amostras dos solos da bacia. Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005) distinguem quatro tipos de solos, conforme mostra o Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras (continua)

Grupo Hidrológico A

- Solos muito profundos (profundidade > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm);
- Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância a erosão;
- Solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20);
- Solos de textura média;
- Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macroporosidade em todo o perfil;
- Solos bem drenados ou excessivamente drenados;
- Solos com argila de atividade baixa, minerais de argila 1:1;
- As texturas dos horizontes superficial e subsuperficial podem ser: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa.

Enquadra-se neste grupo o:

LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.

Grupo Hidrológico B

- Solos profundos (100 a 200 cm);
- Solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância à erosão;
- Solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50;
- Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso;
- Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macroporosidade em todo o perfil;
- Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1;
- As texturas dos horizontes superficial e subsuperficial podem ser: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa.

Enquadra-se neste grupo o:

LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO, NITOSSOLO VERMELHO, NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.

Quadro 1 – Classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras (conclusão)

Grupo Hidrológico C

- Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm);
- Solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão;
- Solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta;
- Solos associados à argila de atividade baixa;
- A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa.

Enquadra-se neste grupo o:

ARGISSOLO pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; CAMBISSOLO de textura média e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.

Grupo Hidrológico D

- Solos com taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância à erosão;
- Solos rasos (profundidade < 50 cm);
- Solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade, minerais de argila 2:1;
- Solos argilosos associados à argila de atividade alta;
- Solos orgânicos.

Enquadra-se neste grupo o:

NEOSSOLO LITÓLICO, ORGANOSSOLO, GLEISSOLO, CHERNOSSOLO, PLANOSSOLO, VERTISSOLO, ALISSOLO, LUVISSOLO, PLINTOSSOLO, SOLOS DE MANGUE, AFLORAMENTOS DE ROCHA, demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.

Fonte: SARTORI, (2004) *apud* Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005).

Conhecidos os grupos hidrológicos aos quais pertencem os solos da bacia em estudo e os usos e ocupação do solo na mesma, é possível determinar os CN's, através de tabelas existentes na literatura. Há inúmeras tabelas existentes para valores de CN, entre essas estão as elaboradas pelo USDA (1986) (Apêndice), que informam o valor de CN de diversos tipos de uso do solo, para os quatro grupos hidrológicos e condições de umidade antecedentes.

3.4.3 Hidrograma Unitário Sintético

Determinada a vazão máxima, o hidrograma de enchente pode ser obtido através do hidrograma unitário observado, a partir das equações de convolução ou, quando não há dados históricos disponíveis, a partir do hidrograma unitário sintético, determinado a partir de parâmetros relacionados com as características físicas das bacias (GENOVEZ, 2001).

O hidrograma representa graficamente a variação da vazão em relação ao tempo, numa determinada seção de controle do curso d'água de interesse. Este é caracterizado por seu volume e forma, que juntos determinam o valor da vazão de pico. Pode-se dizer que o hidrograma é o hietograma de chuva excedente modificado pelas características de escoamento da bacia, somado às contribuições dos escoamentos subsuperficial e subterrâneo. A vazão nessa seção é a soma da precipitação recolhida diretamente pela superfície livre das águas, do escoamento superficial propriamente dito, do escoamento subsuperficial e da contribuição do lençol de água subterrâneo. Nos estudos de cheias, considera-se de forma mais detalhada o escoamento superficial direto (ESD). Assim, a contribuição do escoamento subsuperficial e subterrâneo é admitida de forma simplificada (SILVEIRA, 2010).

A forma do hidrograma é usualmente determinada em função dos parâmetros de tempo como se apresenta na Figura 2. O hidrograma mostrado é formado por um bloco único de chuva excedente com duração “D” e intensidade constante; “ t_c ” é o tempo de concentração, tempo decorrido desde o término da chuva até o ponto de inflexão, o qual representa o instante em que a contribuição do ponto mais distante da bacia passa pela seção de interesse; “ t_a ” é o tempo de ascensão, ou seja, o tempo decorrido desde o início da chuva excedente até o pico do hidrograma e “ t_b ” é a duração total do escoamento superficial direto; “ t_r ”, tempo de retardo, é o tempo que vai do centro de massa do hietograma de chuva excedente até o pico do hidrograma e VESD é o volume do escoamento superficial direto (SILVEIRA, 2010).

Figura 2 – Parâmetros de um hidrograma

Fonte: Silveira (2010)

O hidrograma unitário é um dos métodos mais práticos para determinação do hidrograma resultante quando há dados observados de chuva e vazão. Quando não é esse o caso, pode-se lançar mão de hidrogramas unitários sintéticos.

A metodologia do Hidrograma Unitário Triangular (HUT) sintético do SCS baseia-se em relações geométricas, pois considera que o hidrograma de cheia apresenta formato triangular e, uma vez determinados o tempo de base e a área desse triângulo, que é numericamente igual ao volume do escoamento superficial, calcula-se a vazão de pico.

O HUT do SCS (Figura 3) é determinado a partir da vazão de pico (Q_p), do tempo de pico (t_p) e do tempo de base (t_b), conforme as equações 7, 8 e 9. O cálculo resume-se em: para a duração “D” escolhida, calcula-se primeiramente o “ t_p ” (Equação 7), com o valor obtido calcula-se o “ t_b ” (Equação 8) e finalmente o “ Q_p ” (Equação 9), que definem o HUT para uma precipitação efetiva unitária.

$$t_p = \frac{D}{2} + 0,6 t_c \quad \text{Equação 7;}$$

$$t_b = t_r^* + t_p = 2,67 t_p \quad \text{Equação 8;}$$

$$Q_p = \frac{2,08 AP_e}{t_p} \quad \text{Equação 9;}$$

Em que:

- Q_p : vazão de pico do HUT ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$);
- A : área da bacia (km^2);
- t_p : tempo de pico (horas);
- t_b : tempo de base (horas);
- t_c : tempo de concentração (horas);
- t_r^* : tempo de recessão (horas);
- D : duração da chuva unitária (horas).

Figura 3 – Hidrograma Unitário Triangular

Fonte: Genovez (2001)

Para se obter o hidrograma de cheia, divide-se a chuva de projeto em intervalos de tempo igual a “D” e para cada uma delas obtém-se a correspondente precipitação efetiva, conforme item 3.4.2. Multiplica-se a vazão máxima (Q_p) pela altura de precipitação efetiva da parcela correspondente, permanecendo iguais os valores de “ t_p ” e “ t_b ”.

3.4.4 Aplicações do método

A seguir são apresentadas algumas aplicações do método. Entre elas, há casos em que os resultados obtidos foram comparados aos resultados existentes e considerados satisfatórios. Em outros, a análise de sensibilidade permitiu concluir que pequenas diferenças entre os parâmetros adotados resultam em grandes diferenças nas vazões de pico.

Segundo Tomaz (2002), David H. Pilgrim e Ian Cordery no capítulo 9 do livro *Handbook of Hydrology* de David R. Maidment escrito em 1993, 1600 pesquisas realizadas nos Estados Unidos (estados de Nevada, Texas e Novo México) chegaram a resultados com variações do pico de vazão de aproximadamente 50 %, devido a dois fatores principais: as adoções do tempo de concentração e do valor do CN.

Segundo Porto (1995), as discrepâncias notadas na determinação das vazões de projeto se devem principalmente à escolha dos parâmetros de projeto, em especial o tempo de concentração e o valor de CN, para os casos em que se utilizam os métodos SCS. Isso se dá principalmente pelo fato desses parâmetros representarem fenômenos complexos e serem influenciados por inúmeros fatores. Para ilustrar o efeito desses parâmetros foi realizado um estudo, para a determinação do hidrograma de cheia, em uma bacia urbana com 10 km² de área de drenagem. A análise de sensibilidade dos resultados demonstrou que, quando se varia o CN de 90 para 85 e o tempo de concentração de 0,8 h para 1 h, obtém-se a variação da vazão de 71 m³.s⁻¹ para 44 m³.s⁻¹. As diferenças entre os parâmetros podem ser consideradas pequenas e estar dentro de faixas de erros usuais em hidrologia, porém geram resultados com discrepância de 62 %.

Abdullah et al. (2004) aplicaram o método SCS para a bacia Sungai Tasoh localizada na Malásia. Com o estudo foi possível concluir que o uso do método SCS resultou numa boa estimativa da vazão máxima e do volume do hidrograma, isso porque este foi calibrado a partir de hidrogramas de cheia observados.

Mishra et al. (2003) desenvolveram o modelo Curva Número Modificado (CN-MMS) incorporando a umidade antecedente e a precipitação pluvial acumulada de cinco dias anteriores, bem como a variação nos valores do coeficiente de perdas iniciais. Um procedimento foi sugerido para a determinação do índice de armazenamento d'água no solo da bacia, com o uso de uma quantidade de precipitação antecedente de 5 dias. O método modificado apresentou um bom desempenho para os mesmos conjuntos de dados utilizados

pelo SCS, porém a versão modificada requer um conhecimento prévio da taxa de infiltração mínima, além de ser um modelo que utiliza 2 (dois) parâmetros, o que o torna mais complexo.

Beskow et al. (2009) realizaram um estudo em uma bacia hidrográfica localizada no município de Nazareno, estado de Minas Gerais, com área de 477 ha e declividade média de 13,64 %, caracterizada pelo predomínio de Latossolos, pois ocupam 70 % da bacia. Neste estudo, foram utilizados os modelos hidrológicos SCS e Curva Número Modificado (CN-MMS), com auxílio de um SIG. Para simulação e avaliação de ambos os modelos, foram aplicados 18 eventos de chuva natural e suas respectivas lâminas de escoamento observadas, durante o ano hidrológico 2004-2005. O modelo CN-MMS apresentou melhor calibração quando comparado ao modelo SCS, devido à consideração direta da umidade inicial do solo. As lâminas do escoamento simulado pelos modelos estruturados no SIG apresentaram resultados satisfatórios, demonstrando que a aplicação dos métodos em ambiente SIG produz melhores resultados.

Kabiri et al. (2013) aplicaram os métodos SCS e Green-Ampt em uma bacia de 674 km², localizada na Malásia, para a estimativa da vazão de pico e do volume do escoamento superficial direto e compararam os resultados com os obtidos a partir de dados observados. Não houve diferenças significativas entre os resultados, porém a aplicação do SCS é mais fácil quando comparada à aplicação do método Green-Ampt.

Isik et al. (2013) desenvolveram um modelo híbrido, baseado em Redes Neurais Artificiais (ANNs, sigla em Inglês) e no SCS, para prever o efeito das Mudanças nos Usos/Coberturas da Terra (LULC, sigla em Inglês), nas vazões diárias. As ANNs são métodos computacionais concebidos para modelar a forma como o cérebro humano desempenha uma tarefa ou função de interesse particular e podem ser muito poderosos na modelagem de séries de dados suficientemente longas. Assim, o método SCS foi utilizado no estudo para a obtenção de estimativas iniciais do escoamento superficial. Essas estimativas foram então usadas como entradas para o modelo ANNs, juntamente com outros parâmetros para prever o escoamento superficial direto e o escoamento de base, soma que produz a vazão. O estudo mostrou a força do acoplamento de um modelo semi-empírico, ou seja, método SCS, com uma abordagem baseada em dados, ou seja, ANNs, na previsão dos efeitos das mudanças do uso e cobertura, na vazão. A principal limitação desta abordagem é a necessidade de uma série suficientemente longa de dados históricos de vazão de vários mananciais.

Deshmukh et al. (2013) estimaram o *Curve Number* para três bacias hidrográficas, Barureva, Sher e Umar, localizadas na Índia, utilizando-se três métodos diferentes. Assim, os CN's foram calculados com base em eventos chuva-vazão observados, no uso e cobertura do

solo e na declividade do terreno. Foi possível concluir entre outras questões que, apesar do efeito da inclinação no volume de escoamento já tenha sido claramente estabelecido, algumas tentativas têm sido feitas para estudar o efeito do relevo no método SCS. Deste modo, o estudo mostrou que o CN ajustado pela inclinação é inferior ao CN convencional em áreas com declive inferior a 5 % e maior que o CN convencional para áreas com declividade superior a 5 %. Além disso, uma significativa diferença no CN é observada nas áreas florestais que geralmente estão localizadas em encostas. Assim, para o planejamento de microbacias hidrográficas, o método SCS deve ser modificado para incorporar os efeitos das mudanças no uso e ocupação do solo, além do efeito da inclinação do terreno. Mais pesquisas são necessárias para estudar o efeito de parâmetros morfológicos no CN.

Nayak et al. (2012) investigaram os efeitos das mudanças do uso da terra no escoamento superficial. Para tanto, foram utilizadas imagens de satélite referentes a dois períodos diferentes, anos de 2001 e 2007, e interpretadas a partir do *software* Sistema de Informação integrado de Terra e Água (ILWIS, sigla em Inglês), um software gratuito de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) que foi utilizado para elaboração de mapas de uso do solo/cobertura, análise de sua distribuição espacial e das mudanças ocorridas entre os dois períodos. Os autores chegaram à conclusão de que os dados de sensoriamento remoto são de grande utilidade para a estimativa de parâmetros hidrológicos, tais como: cobertura de uso do solo/terra, solos, geomorfologia, drenagem, etc. O SIG oferece potencial para aumentar o grau de definição de subunidades espaciais, em número e em detalhe descritivo. Além disso, a combinação entre o sensoriamento remoto e modelo SCS permite uma estimativa de escoamento mais precisa e rápida, pois o SIG é uma ferramenta eficiente para a preparação dos dados de entrada exigidos pelo modelo SCS.

3.5 Uso e Ocupação do Solo

3.5.1 Imagens de Satélite e Classificação do Uso e Ocupação do Solo

As imagens de satélites, as quais são obtidas através de sensoriamento remoto, podem ser utilizadas para identificar tipos de uso e ocupação de solos em grandes áreas, sendo a ferramenta mais adaptada para a realização de levantamento e monitoramento do uso e

ocupação dos solos, com a necessidade de se realizar trabalho de campo apenas para a verificação dos resultados por amostragem.

Segundo Martins (2012), a utilização de imagens de satélite aliada a técnicas de processamento digital de imagens e SIG é uma ferramenta poderosa e bastante adequada para a obtenção de parâmetros hidrológicos, entre eles o CN. Além disso, o cálculo de variáveis hidrológicas em ambiente SIG é apropriado e melhores serão os resultados quanto melhores forem os materiais cartográficos disponíveis e a imagem de satélite, bem como a experiência do operador e o seu grau de conhecimento da área estudada.

O sensoriamento remoto é definido como o conjunto de técnicas destinadas à obtenção de informações sobre objetos sem que haja contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto. A condição principal imposta por essa definição é que o sensor esteja a uma distância remota do objeto. Há ainda uma definição mais científica, que define o sensoriamento remoto como uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre, por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres. (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Há atualmente uma razoável constelação de satélites, com diferentes tipos de sensores, que oferecem imagens para atender às necessidades de usuários com demandas diversas. Assim, a combinação entre satélites artificiais e sensores “imageadores” tem a capacidade de “imagear” em curto espaço de tempo toda a superfície terrestre de maneira sistemática, produzindo as conhecidas imagens de satélite. O que difere uma imagem de outra é o tipo de sensor que as captura e uma forma de se abordar as potencialidades de um sensor é o dimensionamento de suas resoluções (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Para usuários que necessitam de uma observação detalhada do tamanho e das formas dos objetos, há os sensores que detectam áreas unitárias inferiores a 1 metro, e com meios para visualização estereoscópica 3D, muito úteis para levantamentos cadastrais com múltiplas finalidades, urbanos e cartografia digital. Os interessados em monitoramento para o acompanhamento da evolução e de mudanças da paisagem podem recorrer aos sensores com alta taxa de revisita à área. Já para os que se interessam em determinar a composição ou constituição dos minerais ou rochas, a procura deve ser pelos sensores com um grande número de bandas espectrais (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Assim, nas aplicações de sensoriamento remoto em estudos geotemáticos está sempre presente a questão sobre qual a melhor resolução da imagem para se identificar ou resolver os objetos de interesse.

Devido à limitação que o sensor orbital tem para transmitir grandes volumes de dados para as estações terrestres de rastreamento de satélites, as imagens que recobrem grandes áreas, de dezenas de milhares de quilômetros quadrados, como as do satélite *Landsat* e *CBERS* (*China-Brazil Earth Resources Satellite*), são associadas com resoluções espaciais pequenas (30 ou 20 metros), e as imagens que recobrem pequenas áreas, como as imagens *Ikonos* e *Orbview*, são associadas com resoluções espaciais grandes (1 metro). Consequentemente, as imagens de pequena resolução espacial, por não mostrarem os detalhes dos alvos, servirão para estudos em escalas mais regionais, enquanto as imagens com grande resolução espacial se prestarão para estudos locais de maior detalhe.

Na prática, a detecção ou identificação de um objeto nas imagens de sensoriamento remoto não é determinada somente pela resolução espacial, mas por quatro diferentes formas de medições:

- pela área do campo de visada do sensor;
- pelo comprimento de onda das bandas;
- pelos valores numéricos da medida da radiância do alvo;
- e pela data em que a imagem foi tomada.

Essas quatro formas de medidas são descritas em termos de resoluções, respectivamente denominadas de resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal. Elas atuam em conjunto, num processo interativo, nem sempre facilmente percebido pelo analista, o que é, também, o motivo de frequentes dúvidas ao se tentar explicar por que pequenos objetos são surpreendentemente identificados nas imagens.

A identificação do uso e ocupação do solo pode ser realizada através da interpretação de imagens de satélite, que consiste em identificar objetos e repassar a informação a outros semelhantes. Esse processo é chamado de classificação de imagens.

Há basicamente 2 (dois) tipos de classificação digital de imagens, a tradicional e a análise orientada a objetos, sendo que a classificação tradicional pode ser supervisionada ou não supervisionada.

A classificação não supervisionada requer pouca ou nenhuma participação do analista no processo de classificação da imagem. Podendo ocorrer quando não se tem conhecimento suficiente acerca do número e natureza das classes de alvos que possam estar presentes numa área, ou quando se precisa fazer uma classificação exploratória da imagem, para rapidamente e sem grande esforço, saber as possíveis classes de alvos que podem aparecer na imagem. Fica sob a responsabilidade do analista, depois da classificação, a associação de um

significado às classes resultantes. O treinamento não supervisionado é quase que totalmente automatizado pelo computador. Ele apenas permite ao analista especificar alguns parâmetros que o computador irá usar para descobrir padrões que são inerentes aos dados. Esses padrões não necessariamente correspondem às características reais da cena em termos de classes de alvos que reconhecemos. Eles são simplesmente agrupamentos de pixels com características espectrais similares (*clusters*). Mas, em alguns casos, pode ser mais importante identificar grupos de pixels com características espectrais similares, do que separar os pixels em classes reconhecidas.

A classificação supervisionada, por sua vez, requer conhecimentos prévios das classes de alvos, a fim de classificar a imagem nas classes de interesse pré-fixadas pelo analista. O algoritmo necessita ser treinado para poder distinguir as classes uma das outras. O treinamento supervisionado é controlado de perto pelo analista. Nesse processo, o analista escolhe pequenas áreas de amostras na imagem, contendo poucas centenas de pixels que sejam bem representativos, espectralmente, de padrões ou feições dos alvos por ele reconhecidos, ou que podem ser identificados com a ajuda de outras fontes, tais como dados coletados no campo ou de mapas. Não há nenhuma restrição no número de classes a serem classificadas, apenas que o analista faça uma seleção de classes bem distintas porque, caso contrário, no final da classificação ocorrerá muita confusão entre as classes. Se o treinamento tiver uma boa precisão, as classes resultantes representam as categorias dos dados que o analista identificou originalmente. Há vários métodos de classificação supervisionada: paralelepípedo, distância mínima, distância de Mahalanobis e máxima verossimilhança.

A classificação por Análise Orientada ao Objeto (AOO) divide-se em duas etapas: segmentação e classificação.

A segmentação de imagens consiste num processo de agrupamento de pixels que possuem características semelhantes. Assim, as características do meio (regiões) são consideradas e não exclusivamente os valores espectrais dos pixels. Isso o distingue dos processos de classificação realizados pixel a pixel.

Após a segmentação, dá-se início à classificação da imagem, sendo necessário previamente escolher as classes em que serão enquadrados os objetos segmentados. Após a definição de todas as classes da imagem, as amostras são selecionadas diretamente na imagem. Ao fim deste processo, é feita a classificação de toda a imagem, resultando em um mapa temático composto por polígonos, no qual cada um destes representa um objeto real da área classificada.

A classificação por segmentação se aproxima mais daquela feita, de forma qualitativa, por intérpretes humanos, pois as condições texturais da imagem passam a ser consideradas nesse tipo de abordagem, produzindo índices de exatidão mais elevados (MENESES; ALMEIDA, 2012).

3.5.2 Sistema de Informações Geográficas

A determinação do CN pode ser auxiliada pela utilização de um Sistema de Informações Geográficas – SIG para a geração dos mapas de uso e ocupação do solo, pois para cada objeto geográfico a ser representado, o SIG tem como requisito armazenar seus atributos e representações gráficas associadas. Assim, as informações disponíveis sobre um determinado assunto estão inter-relacionadas com base em suas localizações geográficas. Para tanto é necessário que a geometria e os atributos dos dados estejam georreferenciados dentro do SIG (DAVIS; CÂMARA *apud* DECINA, 2012).

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) podem ser utilizados para a produção de mapas aplicados a diversos campos do conhecimento. De uma forma geral, sempre que a espacialização de dados ou atributos em um sistema informatizado for relevante para o problema em questão, há uma oportunidade de se considerar a utilização de um SIG, o qual permite a geração de mapas com a delimitação e classificação do uso e ocupação do solo (DAVIS; CÂMARA *apud* DECINA 2012).

3.6 Chuvas de Projeto

A precipitação apresenta-se em diversas formas na natureza: chuva, granizo, geada, neve, etc., sendo que a chuva, precipitação na forma líquida, é a principal fonte dos problemas de drenagem urbana no Brasil e em outras localidades que apresentam climas semelhantes. Assim, para a geração de hidrogramas, e posteriormente avaliação dos efeitos causados pelas suas vazões de pico, é necessário o cálculo de chuvas de projeto, ou precipitações, utilizadas nas simulações hidrológicas. (CANHOLI, 2005)

Na estimativa da chuva de projeto, considera-se um hietograma de intensidade de precipitação constante, com duração igual ou superior ao tempo de concentração da bacia, com o intuito de garantir a contribuição de toda a área drenada.

Um dos métodos mais utilizados para a definição da chuva de projeto consiste na adoção de chuvas padronizadas, que em alguns casos são derivadas de dados pluviométricos existentes, e em outros, devido à ausência de dados observados, são obtidas a partir das relações IDF (intensidade-duração-frequência). As curvas IDF são construídas a partir de registros históricos de alturas de precipitação *versus* duração de uma determinada localidade. Esses valores são tabulados e processados estatisticamente, resultando nas curvas IDF (CANHOLI, 2005). A "intensidade" corresponde à relação entre altura precipitada e sua "duração", para uma dada "frequência", ocorrências num determinado número de anos, traduzida em período de retorno.

A partir da equação IDF define-se o total precipitado e a distribuição temporal dos volumes precipitados condicionará o volume infiltrado e a forma do hidrograma de escoamento superficial direto, originado pela chuva excedente (ZAHED FILHO, 1995).

3.7 Distribuição Temporal da Chuva

Para se realizar a modelação hidrológica e se obter hidrogramas de cheia, é necessário que haja uma distribuição temporal do volume precipitado, a qual apresenta grande variabilidade durante as tempestades.

Segundo Tiecher et al. (2013), na obtenção de um hietograma de projeto a partir da IDF, é necessária a distribuição temporal da chuva ao longo de sua duração, pois apesar de ser uma importante característica pluviométrica, esta é perdida quando os dados de chuva são sintetizados na forma de uma equação IDF. No Brasil, comumente são empregados métodos desenvolvidos para uma realidade estrangeira. Os autores supracitados realizaram uma análise sobre a distribuição temporal real das chuvas na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul e chegaram à conclusão de que o padrão real de distribuição temporal é significativamente diferente daquele que seria obtido através do método dos Blocos Alternados. Assim, recomendam o desenvolvimento de padrões de distribuição temporal específicos para cada região.

Tendo em vista o que foi apresentado, a análise desse procedimento e como ele afeta os resultados é também de grande interesse para se avaliar a sensibilidade dos métodos SCS.

A seguir apresenta-se uma breve descrição de como aplicar os métodos empíricos: Blocos Alternados, Huff e *Bureau of Reclamation* (1977), os quais são muito utilizados para se proceder a distribuição temporal dos volumes precipitados e compor hietogramas.

3.7.1 Método dos Blocos Alternados

O método dos Blocos Alternados está entre os métodos de utilização mais simples para a distribuição temporal de uma precipitação máxima. Não se relaciona com fenômenos físicos, apenas propõe a distribuição de totais de chuva em intervalos de tempo contidos na duração total (ZAHED FILHO, 1995).

Com base nas curvas IDF, a partir da hipótese de que o somatório dos volumes de precipitação, à medida que se acrescentam blocos, coincide com o valor definido pelas curvas IDF para cada duração parcial, é possível construir a chuva de projeto sintética. A colocação dos blocos no hietograma é arbitrária e pode conduzir a diversas configurações. Há regras empíricas que devem conduzir a picos mais elevados, as quais determinam que a parcela mais intensa da precipitação seja colocada entre $1/3$ e $1/2$ da duração da chuva e, para composição do hietograma de projeto, os demais blocos podem ser colocados alternadamente, à esquerda e à direita do pico (CANHOLI, 2005).

Para a aplicação do método, primeiramente, define-se a duração da tormenta, e o intervalo de discretização (Δt) arbitrariamente, e através da relação IDF, obtém-se a intensidade de chuva para cada duração. Quanto menor for este intervalo, maiores serão as intensidades de pico. Utilizando-se da “regra de três”, transformam-se as intensidades de chuva em alturas de chuva, acumulando-as até o último intervalo de tempo. Prossegue-se calculando o incremento dos totais acumulados, os quais devem ser rearranjados conforme descrito no parágrafo anterior (ZAHED FILHO, 1995).

Apesar do Δt ser definido arbitrariamente, este deve ser igual ou um submúltiplo do Δt utilizado no modelo chuva-vazão adotado e não deve ser maior que o tempo de concentração da bacia de drenagem considerada. (CANHOLI, 2005).

3.7.2 Método de Huff

Em 1967, Huff desenvolveu um método para a distribuição temporal da chuva a partir de dados da região Centro-Leste de Illinois, EUA, observados no período de 1955 a 1966. Foram analisadas 261 tormentas, com durações de 30 minutos a 48 horas de uma rede de 49 postos pluviográficos, distribuídos em uma área de cerca de 1000 km². Ele dividiu os registros históricos em quatro grupos, denominados “quartis”, sendo que cada um deles representa $\frac{1}{4}$ da duração total da chuva. Deste modo, as tormentas foram classificadas e agrupadas de acordo com o quartil em que a chuva mais intensa ocorreu. (CANHOLI, 2005).

Para os dados de chuva de cada quartil, fez-se uma análise estatística com o intuito de se obter as curvas de distribuição temporal média, associadas a uma probabilidade de ocorrência. As figuras abaixo apresentam os resultados obtidos e refletem a distribuição média da chuva com o tempo (ZAHED FILHO, 1995).

Figura 4 – Distribuições temporais de chuvas do primeiro quartil

Fonte: Zahed Filho, 1995.

Figura 5 – Distribuições temporais de chuvas do segundo quartil

Fonte: Zahed Filho, 1995.

Figura 6 – Distribuições temporais de chuvas do terceiro quartil

Fonte: Zahed Filho, 1995.

Figura 7 – Distribuições temporais de chuvas do quarto quartil

Fonte: Zahed Filho, 1995.

A relação entre a duração da chuva e o quartil que recebeu a maior intensidade de precipitação é apresentada no Quadro 3.

Quadro 3 – Relação entre a duração da chuva e o quartil que melhor representa o fenômeno

Duração da Chuva	Quartil
$t_d < 12h$	1°, 2°.
$12h < t_d < 24h$	3°
$t_d > 24h$	4°

Fonte: CANHOLI, 2005

Conforme se pode observar no quadro, para as durações inferiores a 12 horas, a adoção do 1°. ou 2°. quartil deve ser verificada de acordo com as respectivas vazões excedentes, que variam em função das perdas e condições iniciais do terreno. Para as durações entre 12 e 24 horas adota-se o 3° quartil e para as maiores que 24 horas, o quarto (CANHOLI, 2005).

3.7.3 Método do *Bureau of Reclamation*

O método do *Bureau of Reclamation* (1977) dos EUA tem um procedimento de cálculo muito parecido com o do método dos Blocos Alternados. Assim como no método dos Blocos Alternados, para a aplicação deste método primeiramente deve-se determinar as precipitações correspondentes a diferentes durações - cerca de 6 (seis) durações - até o tempo de concentração ou duração total. Em seguida, determinam-se os incrementos de chuva correspondentes a cada incremento de precipitação. A diferença entre os métodos está no rearranjo dos incrementos, pois neste o rearranjo é realizado conforme a ordem de magnitude, da seguinte forma: 6, 4, 3, **1**, 2, 5. Ao colocar o maior valor no quarto intervalo (em negrito), procura-se maximizar o pico do hidrograma, considerando que as chuvas iniciais atendem às perdas por infiltração e depressões da bacia e o incremento maior tende a gerar um volume maior de escoamento superficial. (TUCCI, 2001).

3.8 Tempo de Concentração

Como já mencionado, um dos parâmetros hidrológicos mais utilizados como tempo de resposta da bacia hidrográfica, no cálculo para transformação da chuva em vazão para composição do hidrograma, é o tempo de concentração (t_c). Este é definido como o tempo mínimo necessário para que toda a área da bacia contribua para o escoamento superficial em seu exutório. Ou ainda, o tempo entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma, que identifica o início da recessão do escoamento superficial direto.

Há diversas maneiras e fórmulas para se estimar o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica. Os fatores que influenciam no tempo de concentração da mesma são:

- Forma;
- Declividade média;
- Tipo e grau da cobertura vegetal;
- Comprimento e declividade do curso principal e de seus afluentes;
- Distância horizontal entre o ponto mais afastado da bacia e sua saída;
- Condições do solo em que a bacia se encontra no início da precipitação.

Entre as fórmulas existentes na literatura técnico-científica, há fórmulas que foram desenvolvidas para determinar o tempo de concentração diretamente e outras foram desenvolvidas para estimar o tempo de retardo (*lag time*), definido como: intervalo de tempo entre o centro de gravidade temporal da chuva e o respectivo centro de gravidade do hidrograma, deste modo, estima-se o t_c a partir da relação entre esses tempos. O SCS, baseado nas análises efetuadas para obtenção do HUT sintético, definiu o tempo de retardo (t_r) como 0,6 vezes o tempo de concentração (t_c) (GENOVEZ, 2001).

A literatura apresenta inúmeras fórmulas para o cálculo dos tempos de concentração e de retardo, sendo a maioria delas fórmulas empíricas, que levam a diferentes resultados.

Bondelid et al. (1982) *apud* McCuen; Wong; Rawls, (1984) mostraram que mais de 75 % dos erros nas estimativas de vazões de pico podem ser resultado de erros no cálculo do tempo de concentração.

Silveira (2005) comparou 23 fórmulas de tempo de concentração para bacias urbanas e rurais. O Quadro 4 apresenta os resultados obtidos.

Quadro 4 – Resultados dos estudos realizados sobre fórmulas para cálculo de tempo de concentração

Nome	Número de bacias rurais	Área da bacia (km ²)	Erro médio absoluto (%)	Erro padrão (%)	Número de bacias urbanas	Área da bacia (ha)	Erro médio absoluto (%)	Erro padrão (%)
Izzard	23	25-2046	6	24	10	0,6-6	32	37
Kerby-H	16	168-11162	18	26	26	0,1-62	-7	32
Onda Cin.	27	6-11162	2	20	18	0,2-5	34	52
FAA	16	168-11162	37	28	22	0,2-12	-6	34
Kirpich	18	153-11162	-9	19	16	4-2620	1	39
SCS Lag	-	-	-	-	6	0,5-3	15	34
Simas-H	9	484-11162	21	43	5	160-2620	1	32
V. Chow	27	6-11162	-7	19	11	0,2-0,7	52	71
Dooge	26	6-7355	29	24	12	0,2-4	-32	17
Johnstone	23	39-11162	26	29	-	-	-	-
Corps E.	29	0-11162	9	21	16	0,2-6	-8	32
Giandotti	25	6-11162	25	28	-	-	-	-
Pasini	7	6-44	20	25	16	0,2-6	-22	30
Ventura	8	6-72	18	22	14	0,2-5	-29	29
Picking	-	-	-	-	25	0,2-1070	3	40
DNOS	16	25-420	8	30	16	4-2620	-10	39
G. Ribeiro	6	1-39	23	34	9	6-600	4	26
Schaake	-	-	-	-	26	0,1-62	-9	30
McCuen	-	-	-	-	11	0,5-6	5	28
Carter	-	-	-	-	29	0,2-1070	1	40
Eagleson	15	72-1670	9	39	7	2-6	-9	29
Desbordes	-	-	-	-	20	0,2-5100	11	49
Espey	-	-	-	-	7	5-19	32	38

Fonte: Silveira (2005).

Conforme o estudo realizado por Silveira (2005), entre as fórmulas apresentadas no Quadro 4, as recomendadas para bacias urbanas são: em primeiro lugar a fórmula de Carter, pois apresenta um resultado satisfatório em um maior número de bacias urbanas; em segundo lugar a de Schaake, para bacias muito pequenas; e em terceiro lugar a de Kirpich.

Segundo Pompêo (2001), ao longo do caminho percorrido por uma gota de água teórica para ir do ponto mais afastado da bacia até a seção de interesse podem ocorrer diferentes tipos de escoamentos, tais como: escoamento direto à superfície e escoamento em canais. Assim, os tempos de percurso podem ser determinados para cada segmento de fluxo separadamente e somados a fim de se obter o tempo de concentração resultante. Dois percursos que podem ser somados é o tempo de entrada e o tempo de percurso. O tempo de entrada é o tempo necessário para que a precipitação que cai sobre a superfície da bacia e escoar superficialmente atinja um curso d'água definido. Este tempo é função, principalmente, da cobertura da superfície, sua taxa de infiltração e declividade, armazenamento em depressões e comprimento livre do escoamento superficial. O tempo de percurso é o tempo médio de escoamento em cursos d'água definidos, sendo função de suas características hidráulicas. Resumidamente, o tempo de entrada pode ser calculado através de fórmulas empíricas, até a entrada do sistema de drenagem definido (córregos, canais, galerias, etc.). Daí em diante, pode-se calcular o tempo a partir da velocidade média no conduto.

3.8.1 Fórmula de Carter

A fórmula apresentada abaixo foi desenvolvida por Carter (1961) para o cálculo do tempo de retardo, com base em dados de 5 (cinco) bacias localizadas nas imediações de Washington, capital dos EUA, nas quais o desenvolvimento urbano é praticamente completo, com o canal principal em condições naturais.

$$t_r = 1,20 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,6}$$

Equação 10;

Na qual:

- t_r : Tempo de retardo (horas);
- L: Comprimento do talvegue (milhas);
- S: Declividade equivalente do talvegue (pés/milhas).

Carter (1961) não apresentou limitações quanto à área da bacia, declividade e comprimento do talvegue. Mas, segundo McCuen; Wong; Rawls, (1984), a fórmula deve ser utilizada para bacias com até 21 km², comprimento do talvegue inferior a 12 km e declividade equivalente inferior a 0,5 %. Já segundo Silveira (2005), a equação de Carter leva a resultados satisfatórios quando aplicada a bacias urbanizadas com área entre 0,02 e 10,70 km², pois em seu estudo, nessas condições, apresentou um erro médio de apenas 1 %.

A seguir, apresenta-se a fórmula de Carter (1961) adaptada para o cálculo do tempo de concentração, conforme utilizada por Silveira (2005).

$$t_c = 0,0977 \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3} \quad \text{Equação 11;}$$

Na qual:

- t_c : Tempo de concentração (horas);
- L: Comprimento do canal principal (km);
- S: Declividade média do canal principal (m/m).

Quando aplicada para esses parâmetros, comprimento do canal e declividade média do canal, conforme definido por Silveira (2005), os resultados não são semelhantes aos gerados a partir da fórmula original. Assim, chega-se a conclusão de que para obter-se t_c em horas, deve-se utilizar: comprimento do talvegue em km e declividade equivalente do talvegue em m/m.

3.8.2 Fórmula de Schaake

A fórmula apresentada abaixo foi desenvolvida por Schaake; Geyer; Knapp, (1967) para o cálculo do tempo de retardo, com base em dados de 19 (dezenove) bacias urbanas de drenagem localizadas em Baltimore, Maryland, EUA.

$$t_r = \frac{1,05L^{0,24}}{S^{0,16}IMP^{0,26}}$$

Equação 12;

Na qual:

- t_r : Tempo de retardo (minutos);
- L : Comprimento do canal principal (centenas de pés);
- S : Declividade média do canal principal (pés/pés);
- IMP : área de drenagem impermeável (varia entre 0 a 1).

Segundo Schaake; Geyer; Knapp, (1967), a fórmula deve ser utilizada para bacias com comprimento do canal principal maior que 150 pés e menor que 6.000 pés, declividade entre 0,5 e 6 % e área de drenagem impermeável maior que 8 %.

De acordo com Silveira (2005), a fórmula deve ser utilizada para bacias urbanas com até 62 hectares. Ele ainda conclui que, para bacias urbanas com áreas abaixo de 70 hectares, é a mais indicada.

A seguir apresenta-se a fórmula de Schaake adaptada para o cálculo do tempo de concentração, conforme apresentada por Silveira (2005).

$$t_c = 0,0828L^{0,24}S^{-0,16}A_{imp}^{-0,26}$$

Equação 13;

Na qual:

- t_c : Tempo de concentração (horas);
- L : Comprimento do canal principal (km);
- S : Declividade média do canal principal (m/m);
- A_{IMP} : fração de área impermeável (varia entre 0 e 1).

3.8.3 Fórmula de Kirpich

A fórmula apresentada abaixo foi desenvolvida por Kirpich (1940) para o cálculo do tempo de concentração, com base em dados de 6 (seis) bacias rurais de drenagem localizadas em Tennessee, EUA.

$$t_c = 0,0053L^{0,8}S^{-0,4} \quad \text{Equação 14;}$$

Na qual:

- t_c : Tempo de concentração (min.);
- L : Comprimento do talvegue (pés);
- S : Declividade média do talvegue (pés/pés).

Segundo Kirpich (1940), a fórmula deve ser utilizada para bacias rurais com área entre 4,05 km² e 809,37 km².

De acordo com Silveira (2005), apesar da fórmula de Kirpich ter sido desenvolvida para bacias rurais, ela apresentou um desempenho satisfatório em bacias urbanas. Deste modo, é recomendada para determinação do tempo de concentração de bacias urbanizadas com área entre 0,04 e 26,20 km². A seguir, apresenta-se a fórmula de Kirpich (1940) adaptada para o cálculo do tempo de concentração em horas, conforme apresentada por Silveira (2005).

$$t_c = 0,663L^{0,77}S^{-0,385} \quad \text{Equação 15;}$$

Na qual:

- t_c : Tempo de concentração (horas);
- L : Comprimento do talvegue (km);
- S : Declividade média do talvegue (m/m).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo mostra a metodologia empregada para a determinação das vazões máximas e composição dos hidrogramas, na sequência em que foram concebidas. Primeiramente, determinou-se a área de estudo e as principais características e particularidades desta. Após a escolha das ferramentas a serem utilizadas, pode-se então iniciar o desenvolvimento do trabalho.

A base cartográfica em conjunto com as ferramentas do SIG e o *software* para classificação das imagens de satélite permitiram elaborar os mapas que serviram como base para a delimitação das sub-bacias e determinação/cálculo dos parâmetros de entrada do modelo, necessários para alimentar o *software* utilizado para as simulações hidrológicas. Com os resultados das simulações, fez-se a análise de sensibilidade dos parâmetros e dados de entrada do método em questão.

4.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho, área de estudo do presente trabalho, é uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Monjolinho, situada no município de São Carlos, estado de São Paulo (Figura 8).

A bacia em questão integra a Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos Tietê/Jacaré (UGRHI - 13), uma das 22 unidades de gestão de recursos hídricos em que o estado de São Paulo encontra-se dividido.

Figura 8 – Localização Geográfica da Área de Estudo

Fonte: PMSC, 2011.

Esta bacia hidrográfica apresenta uma área de aproximadamente 5,80 km² e perímetro igual a 10,81 km. A diferença entre as cotas mais baixa e mais alta da bacia é da ordem de 81 m e seu comprimento médio é de cerca de 4 km. Em relação à pedologia, os solos são predominantemente Latossolos Vermelho-amarelo, profundos e distróficos nos interflúvios, pertencentes ao grupo hidrológico do tipo B, conforme a classificação proposta pelo *Soil Conservation Service*, e adaptada por Lorandi (1985) e Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005) para as características dos solos brasileiros.

A bacia em questão é interessante para o desenvolvimento de estudos hidrológicos, pois se encontra em processo de urbanização. Localizada em um dos vetores de crescimento do município, apresenta uma grande diversidade de usos do solo, como: residências, condomínios de alto padrão, um *Shopping Center* (Iguatemi São Carlos), um *campus* universitário, pastagens, cultivos de cana-de-açúcar e terrenos vazios.

4.2 Base de dados georreferenciados e *softwares*

A base cartográfica utilizada neste trabalho foi produzida pelo Centro de Divulgação Científica e Cultural (CDCC) da Universidade de São Paulo, em formato AutoCAD e escala 1:10.000, para todas as bacias urbanas do município de São Carlos. Trata-se de um banco de dados com mapas digitalizados, contendo curvas de nível de 5 em 5 metros e diversos pontos cotados, hidrografia (traçado da rede de macrodrenagem e contorno da bacia), arruamento e nome de bairros.

A análise da sensibilidade do parâmetro CN foi realizada através da comparação da delimitação do uso e ocupação do solo da bacia do córrego do Mineirinho, utilizando imagens de alta resolução, as quais não são disponibilizadas gratuitamente, e imagens gratuitas de baixa resolução. A imagem de alta resolução já estava disponível na instituição onde foi realizado o trabalho.

Para a delimitação do uso e ocupação do solo, a partir de imagem de alta resolução, utilizou-se uma imagem do satélite *Worldview-2*, 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 (oito) 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, vermelha e infravermelho próximo

1, com resolução espacial de 2,0 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).

Esta imagem cobre toda a área urbana de São Carlos e uma parcela da área rural, englobando a bacia hidrográfica do córrego do Gregório, a bacia do córrego do Mineirinho e praticamente toda bacia do córrego do Monjolinho. Possui uma suave angulação, devido à posição do satélite não ser completamente ortogonal ao alvo no momento da captura, e uma parcela considerável de sombras. O Datum original da imagem é WGS84.

A imagem de alta resolução utilizada foi a imagem resultante do tratamento realizado por Aprígio (2012) que consistiu na composição das bandas azul, verde e vermelha (RGB), fusionada com a pancromática. Esse processo permitiu melhorar a resolução espacial, por meio de uma transformação espectral que converte o sistema de cores RGB em sistema IHS (Intensidade, Matiz e Saturação), pois a transformação aloca a informação espectral das três bandas em apenas dois canais (matiz e saturação), e substitui a intensidade pela informação da banda pancromática, de melhor resolução. Sendo assim, obteve-se uma imagem colorida, com pixels de 0,5 m. Além disso, foi realizada uma composição falsa-cor, com o infravermelho próximo no canal verde, que facilita a identificação da vegetação.

O outro mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado utilizando uma imagem de baixa resolução gratuita do satélite LANDSAT5, sensor TM, registrada em 30 de maio de 2011. As imagens deste satélite, o qual não está em atividade desde 22 de novembro de 2011, são disponibilizadas gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) com resolução geométrica ou espacial nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 de 30 m (isto é, cada "pixel" da imagem representa uma área no terreno de 0,09 ha). Para a banda 6, a resolução é de 120 m (cada "pixel" representa 1,4 ha) (INPE, 2013).

Foram utilizados também 4 (quatro) *softwares*: 1 (um) para trabalhos em ambientes SIG (ArcGIS10), outro para as classificações automáticas supervisionadas pelo método da análise orientada a objetos (*Definiens Developer*), o terceiro foi utilizado para os cálculos dos parâmetros (EXCEL 2010) e o último para as simulações hidrológicas com base nos métodos SCS (HEC-HMS 3.5) gratuito, disponível para *download* no seguinte link: <http://hec-hms.software.informer.com/3.5/>, acesso em 04 de junho de 2012. Os 3 (três) primeiros *softwares* são de licença privada, mas já estavam disponíveis na instituição onde foi realizado o trabalho.

4.3 Sub-bacias

Para o desenvolvimento do estudo com melhor representação das características físicas da bacia do córrego do Mineirinho, esta foi dividida em 5 (cinco) sub-bacias (Figura 9), considerando os três cursos d'água que compõem a bacia:

- a nascente principal, que nasce no bairro Santa Angelina;
- um afluente na margem direita, que nasce no interior do *campus* 2 da USP;
- e um afluente na margem esquerda, o córrego Santa Fé, que nasce no bairro Santa Felícia.

A subdivisão foi realizada a partir da base cartográfica, em formato CAD e escala 1:10.000. Assim como, o traçado dos talwegues e canais principais.

Figura 9 – Sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Córrego do Mineirinho

4.4 Mapas de uso e ocupação do solo

Tendo em vista que um dos objetivos do trabalho é a comparação entre os resultados obtidos a partir da determinação do CN utilizando imagens de alta e baixa resolução, foi necessário utilizar imagens de datas próximas, para que estas representassem o mesmo uso e ocupação do solo. Assim, pelo fato da imagem de alta resolução já estar disponível na instituição e datar de 02 de junho de 2011, a imagem de baixa resolução foi escolhida em função desta data, sendo de 30 de maio de 2011, as quais não representam mais o uso e ocupação atual do solo da bacia, passados 3 (três) anos. Por esta razão, os trabalhos de reconhecimento de campo não foram realizados e para verificação dos resultados obtidos nas interpretações das imagens, foi realizada uma comparação com o mapa de uso e ocupação do solo elaborado por Aprígio (2012), pois os trabalhos realizados pelo autor incluíram o reconhecimento de campo, os quais foram realizados em datas próximas às datas das imagens utilizadas.

A técnica utilizada para a classificação das imagens de satélite foi a “análise orientada a objetos”, utilizada e recomendada por vários autores, como a mais apropriada para a classificação em ambiente urbano (FRAUMAN; WOLFF, 2005; JACQUIN; MISAKOVA; GAY, 2008; DURIEUX; LAGABRIELLE; NELSON, 2008).

O processo de classificação ocorreu em 3 (três) etapas: definição dos tipos de usos e coberturas do solo a serem identificados, segmentação e classificação da imagem.

Os tipos de cobertura de solo foram definidos considerando-os como alvos da classificação, sendo que a escolha dos alvos se deu após a observação da imagem para reconhecimento das coberturas mais frequentes. Assim, foram escolhidos 6 (seis) tipos de cobertura de solo para a imagem de alta resolução (vegetação arbórea, gramínea, agricultura, solo exposto, telhados e vias pavimentadas) e 5 (cinco) tipos para a imagem de baixa resolução (vegetação arbórea, gramínea, agricultura, solo exposto e área urbana).

Com auxílio do SIG, as imagens foram divididas de acordo com as sub-bacias para que a classificação do uso e ocupação do solo fosse realizada por sub-bacia. Assim, no *software Definens Developer* realizou-se a classificação do uso e ocupação do solo, conforme descrito a seguir.

Iniciou-se com o processo de segmentação, o qual permite particionar os conjuntos de dados contidos nas imagens em diversos segmentos. Para se realizar esse processo é necessário atribuir valores a dois parâmetros: escala e cor/textura, o que permite priorizar

determinadas características dos objetos na segmentação, gerando resultados diferentes conforme a escolha. Assim, foram testados diferentes valores para os parâmetros e optou-se pelos apresentados no Quadro 5 que, qualitativamente, apresentaram melhores resultados na segmentação dos objetos da imagem.

Quadro 5 – Valores de segmentação utilizados em cada sub-bacia do córrego do Mineirinho

Sub-bacia	Imagem de Alta Resolução		Imagem de Baixa Resolução	
	Fator de escala	Cor/Textura	Fator de escala	Cor/Textura
1	80	0,9	5	0,7
2	80	0,9	5	0,7
3	30	0,9	5	0,5
4	30	0,9	5	0,9
5	30	0,9	5	0,9

Após a segmentação, fez-se a classificação das 5 (cinco) sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho gerando um mapa vetorial com a cobertura de solo. Para tanto, eram escolhidas aproximadamente 30 (trinta) amostras bem distinguíveis e representativas de cada tipo de cobertura escolhido para a bacia, as quais serviram de área de treinamento para o *software*.

As amostras de treinamento foram escolhidas por fotointerpretação (interpretação visual da imagem) e, após a seleção, o *software* realizou a classificação de toda a imagem. O processo de classificação ocorreu de forma progressiva, pois o *software* separa a imagem em duas classes por vez, como por exemplo: vegetação e não vegetação, e os tipos de vegetação em: vegetação arbórea e gramínea. Assim, coletaram-se as amostras de treinamento de duas classes por vez, sendo necessário criar uma hierarquia de classes de acordo com os tipos de cobertura existentes em cada sub-bacia. A hierarquia de classes separa os tipos de cobertura dois a dois à medida que a classificação progride, seguindo até que todos os tipos de cobertura determinados sejam classificados.

As duas primeiras classes, imagem e não imagem, serviram para distinguir os objetos que faziam parte das imagens, dos que não faziam, tanto da imagem de alta resolução como os da imagem de baixa resolução, pois como se pode observar na Figura 10 e na Figura 11 o *software* carrega apenas imagens no formato retangular, de forma que as áreas não preenchidas com as imagens são apresentadas na cor branca. Assim, os polígonos que a princípio foram classificados como “imagem”, em uma segunda fase, foram divididos em: “vegetação” e “não vegetação”; os classificados como “vegetação” em: “vegetação arbórea” e “vegetação não arbórea”, e os classificados como “vegetação não arbórea” em: “gramínea” e

“agricultura”. Os polígonos classificados como “não vegetação”, para a imagem de alta resolução, foram divididos em: “telhados” e “não telhados”, e os classificados como “não telhados” foram divididos em: solo exposto e vias pavimentadas. Já para a imagem de baixa resolução, os polígonos classificados como “não vegetação” foram divididos em: área urbana e solo exposto.

Figura 10 – Plataforma do *software Definiens* com a imagem de alta resolução, sub-bacia 1

Figura 11 – Plataforma do *software Definiens* com a imagem de baixa resolução, sub-bacia 1

Ao final do processo de classificação realizou-se uma análise visual dos resultados, possibilitada pelo fato da bacia em estudo ser relativamente pequena. Esta análise foi realizada para identificação de erros provenientes de confusão espectral e correção dos mesmos. Ocorreram alguns erros, principalmente na classificação a partir da imagem de baixa resolução, por exemplo: na sub-bacia 2 uma área que apresenta “vegetação arbórea” foi

classificada como “gramínea” e na sub-bacia 3 uma pequena parte da “área urbana” foi classificada como “vegetação arbórea”. Esses erros não foram corrigidos, para a verificação do efeito que causariam nos valores de CN.

Após a classificação de cada sub-bacia, os resultados foram exportados para ambiente SIG, no qual foi possível elaborar 2 (dois) mapas vetoriais da cobertura de solo da bacia como um todo, um com a classificação do uso e ocupação do solo a partir da imagem de alta resolução (Figura 12) e o outro, a partir da imagem de baixa resolução (Figura 13).

Figura 12 – Mapa de uso e ocupação do solo elaborado a partir de imagem de alta resolução

Figura 13 – Mapa de uso e ocupação do solo elaborado a partir de imagem de baixa resolução

4.5 Parâmetros de entrada do modelo HEC-HMS

4.5.1 Área, comprimentos dos talwegues e canais principais e declividades médias e equivalentes

As áreas das sub-bacias foram obtidas a partir do cálculo das áreas dos polígonos que representam as sub-bacias, em metro quadrado e quilômetro quadrado (m² e km²).

Os comprimentos dos talwegues, em metros (m), foram determinados a partir do traçado do sentido do escoamento da água dos pontos mais altos e mais distantes das sub-bacias até seus exutórios. Os comprimentos dos canais foram determinados a partir do traçado destes desde a nascente até os exutórios.

As declividades equivalentes dos talwegues foram obtidas através da equação apresentada abaixo.

$$Si_e = \left[\frac{L}{\sum_{i=1}^n \frac{Li}{\sqrt{si}}} \right]^2$$

Equação 16;

- Si_e : declividade equivalente do talvegue, em m/m;
- L : comprimento do talvegue, que é dividido em n trechos, em m;
- Li : extensão horizontal em cada trecho do talvegue, em m;
- si : declividade média em cada trecho do talvegue, em m/m, sendo o quociente entre a diferença entre as cotas de cada trecho (Δh_i) e a extensão de cada trecho (Li).

As declividades médias dos canais foram calculadas a partir da equação apresentada a seguir, que representa o quociente entre a diferença entre as cotas e a extensão total do canal. A diferença entre cotas é dada pela subtração entre as cotas do ponto mais distante e da seção considerada.

$$S_c = \frac{\Delta h}{L_c}$$

Equação 17;

- S_c : declividade média do canal, em m/m;
- Δh : diferença entre as cotas da nascente e do exutório da bacia, ou da seção de interesse, em m;
- L_c : comprimento do canal, em m.

As características de cada sub-bacia, e da bacia do córrego do Mineirinho como um todo, são apresentadas no Quadro 6, Quadro 7, Quadro 8, Quadro 9 e Quadro 10.

Quadro 6 – Áreas das sub-bacias e da bacia do córrego do Mineirinho

Bacias	Área da bacia (m ²)	Área da bacia (km ²)
SB1	1424011,54	1,4240
SB2	814574,78	0,8146
SB3	347259,24	0,3473
SB4	796525,75	0,7965
SB5	2394547,60	2,3945
B. Mineirinho	5776918,92	5,7769

Quadro 7 – Comprimentos dos talvegues *

Bacias	Comprimento do talvegue (m)	Comprimento do talvegue (km)	Comprimento do talvegue (pés)	Comprimento do talvegue (milhas)
SB1	2344,78	2,34	7692,85	1,45
SB2	1190,49	1,19	3905,81	0,74
SB3	1260,42	1,26	4135,24	0,78
SB4	1408,33	1,41	4620,51	0,87
SB5	2500,24	2,50	8202,89	1,55
B. Mineirinho	4948,14	4,95	16234,06	3,07

* comprimentos dos talvegues foram determinados a partir do traçado do sentido do escoamento da água dos pontos mais altos e mais distantes das sub-bacias até seus exutórios

Quadro 8 – Comprimentos dos canais principais*

Bacias	Comprimento do canal (m)	Comprimento do canal (km)	Comprimento do canal (pés)
SB1	1090,57	1,09	3577,99
SB2	728,48	0,73	2390,03
SB3	428,17	0,43	1404,76
SB4	703,86	0,70	2309,25
SB5	2175,67	2,18	7138,02
B. Mineirinho	3694,14	3,69	12119,87

* comprimentos dos canais foram determinados a partir do traçado destes desde a nascente até os exutórios

Quadro 9 – Declividades equivalentes dos talwegues

Bacias	Declividade equivalente (m/m)	Declividade equivalente (m/Km)	Declividade equivalente (pés/pés)	Declividade equivalente (pés/milhas)
SB1	0,0147	14,69	0,0147	77,75
SB2	0,0285	28,50	0,0285	150,81
SB3	0,0266	26,60	0,0266	140,76
SB4	0,0241	24,10	0,0241	127,53
SB5	0,0229	22,90	0,0229	121,18
B. Mineirinho	0,0146	14,60	0,0146	77,26

Quadro 10 – Declividades médias dos canais principais

Bacias	Declividade média do canal (m/m)	Declividade média do canal (m/Km)	Declividade média do canal (pés/pés)
SB1	0,0238	23,84	0,0238
SB2	0,0329	32,95	0,0329
SB3	0,0093	9,34	0,0093
SB4	0,0227	22,73	0,0227
SB5	0,0184	18,39	0,0184
B. Mineirinho	0,0189	18,95	0,0189

4.5.2 Curve Number

Após a classificação automática das imagens, como já mencionado, os polígonos foram exportados para o *software* ArcGIS, o qual permite o cálculo da área de cada objeto classificado e apresenta um banco de dados composto por características dos polígonos e referências geográficas. Pelo método das médias ponderadas, calculou-se o valor de CN e a porcentagem impermeável para cada sub-bacia. Para o cálculo cada feição foi relacionada a um valor de CN para o tipo hidrológico do solo B, determinado por meio de tabelas obtidas em USDA (1986) - apresentadas no Apêndice, conforme descrito a seguir, no *item a* para as classes da imagem de alta resolução e no *item b* para as da imagem de baixa resolução.

a. Determinação dos CN's - imagem de alta resolução

A classe “gramínea” compreendeu os campos contíguos e entremeados às áreas urbanizadas da bacia, terrenos baldios recobertos com gramíneas. O CN estipulado foi 69 – espaços abertos, com condição hidrológica razoável.

“Vegetação arbórea” compreendeu as árvores de grande porte que se encontram espalhadas pela área da bacia, a mata ciliar (vegetação ribeirinha do córrego do Mineirinho e de seus afluentes) e a silvicultura de *Pinus*, com CN igual a 60 – mata em condição hidrológica razoável.

Como “agricultura”, foram classificadas as parcelas ocupadas por cultivo de cana-de-açúcar. O CN atribuído a esta classe foi 74 – cultivos em linhas, seguindo as curvas de nível do terreno.

“Solo exposto” compreendeu parcelas de território que apresentaram solo sem cobertura vegetal, estradas sem pavimento e terrenos baldios, ou seja, lotes ociosos existentes na malha urbana sem cobertura vegetal. O valor de CN foi definido como 86 – áreas urbanas, em processo de loteamento, ou áreas agrícolas em pousio, sem nenhum tipo de cobertura.

Em “vias pavimentadas”, foram agrupadas as parcelas do território destinadas ao trânsito de veículos com pavimento, as quadras esportivas e praças impermeabilizadas. Foi definido valor de CN igual a 98 – ruas e estradas pavimentadas.

Em “telhados” foram enquadrados todos os telhados independentemente de seus materiais, os quais podem ser diferenciados por suas cores. O valor de CN foi definido como 98 - estacionamentos pavimentados, telhados, calçadas, etc.

b. Determinação dos CN's - imagem de baixa resolução

Para a imagem de baixa resolução cada feição foi relacionada aos valores de CN, conforme descrito a seguir, de forma que para as classes: “gramínea”, “vegetação arbórea”, “agricultura” e “solo exposto” foram atribuídos valores de CN's iguais aos atribuídos para as mesmas classes da imagem de alta resolução.

A classe “gramínea” compreendeu os campos contíguos e entremeados às áreas urbanizadas da bacia, terrenos baldios recobertos com gramíneas. O CN estipulado foi 69 – espaços abertos, com condição hidrológica razoável.

“Vegetação arbórea” compreendeu a vegetação ribeirinha do córrego do Mineirinho e de seus afluentes, a silvicultura de Pinus e as árvores de grande porte que se encontram espalhadas pela área da bacia, com CN igual a 60 – mata em condição hidrológica razoável.

Como “agricultura”, foram classificadas as parcelas ocupadas por cultivo de cana-de-açúcar. O CN atribuído a esta classe foi 74 – cultivos em linhas, seguindo as curvas de nível do terreno.

“Solo exposto” compreendeu parcelas de território que apresentaram solo sem cobertura vegetal. O valor de CN foi definido como 86 – áreas urbanas, em processo de loteamento, ou áreas agrícolas em pousio, sem nenhum tipo de cobertura.

Para a determinação do CN da classe “área urbana” considerou-se o tamanho dos lotes dos bairros em cada sub-bacia. Os tamanhos dos lotes dos bairros considerados foram os apresentados por Aprígio (2012).

Para bairros com lotes entre 125 e 200 m² – Loteamento Social Santa Angelina e os Conjuntos Habitacionais Arnon de Mello e Dr. Lourival Maricondi (São Carlos IV) – adotou-se CN igual a 85 – bairros residenciais com tamanho médio menor ou igual a 500 m². Os bairros citados encontram-se nas sub-bacias 1 e 2.

Nos bairros com lotes maiores que 200 m² e menores que 300 m² – Conjunto Habitacional São Carlos III, Residencial Monsenhor Romeu Tortorelli, Parque Jardim Santa Felícia e Jardim Ipanema, localizados na sub-bacia 3, adotou-se CN igual a 85 – bairros residenciais com tamanho médio dos lotes menor ou igual a 500 m².

Aos lotes com mais de 600 m², Parque Faber I e II, localizados na sub-bacia 5, foi atribuído CN igual a 75 – bairros residenciais com tamanho médio dos lotes 1000 m². Vale lembrar que a sub-bacia 4 não apresentou a classe “área urbana”.

Os resultados obtidos são apresentados a seguir no Quadro 11.

Quadro 11 – Valores de CN para as classes de uso e ocupação do solo das imagens de alta e baixa resolução

Bacias	CN - Imagem Baixa Resolução	CN - Imagem Alta Resolução	Diferença entre os valores (%)
SB1	76,64	81,81	6,33
SB2	76,35	85,47	10,66
SB3	77,82	82,24	5,37
SB4	72,49	77,68	6,68
SB5	71,10	80,08	11,22

4.6 Tempo de concentração, chuvas de projeto e distribuição temporal

4.6.1 Tempo de concentração

As equações para o cálculo do tempo de concentração das sub-bacias foram definidas a partir da análise do trabalho de Silveira (2005), que comparou 23 fórmulas de tempo de concentração para bacias urbanas e rurais e recomendou as fórmulas apresentadas no Quadro 12.

A ordem de recomendação de uso é indicada pelo número que antecede a letra R, para bacias rurais, e U, para bacias urbanas. Assim, apesar das três primeiras recomendadas para bacias urbanas serem as fórmulas de Carter, Schaake e Kirpich, a fórmula de Schaake foi descartada, devido ao fato de ser recomendada para bacias totalmente urbanizadas e com sistema de microdrenagem bem definido: ruas, sarjetas, bocas de lobo, o que não é o caso da bacia do Mineirinho. Assim, as fórmulas escolhidas para a análise de sensibilidade do parâmetro Tempo de Concentração foram as de Carter e Kirpich.

Quadro 12 – Fórmulas de Tempo de Concentração recomendadas por Silveira

Fórmulas	Ordem	Bacias Rurais			Bacias Urbanas		
		Áreas (km ²)	EM (%)	EP (%)	Áreas (km ²)	EM* (%)	EP* (%)
Corps E.	1R	<12000	9	21			
V. Chow	2R	<12000	-7	19			
Onda Cin.	3R	<12000	2	20			
Kirpich	4R, 3U	<12000	-9	19	<2700	1	39
Carter	1U				<1100	1	40
Schaake	2U				<62	-9	30
Desbordes	4U				<5100	11	49

R: rural/ U: urbana

Fonte: Silveira (2005)

*EM: Erro Médio

*EP: Erro Padrão

O Quadro 13 apresenta os tempos de concentração da bacia do Mineirinho e de suas sub-bacias, calculados a partir da aplicação das fórmulas de Carter e Kirpich.

Quadro 13 – Tempos de Concentração da Bacia do Mineirinho calculados a partir das fórmulas de Carter e Kirpich

Bacias	Tempo de Concentração (min.)		
	Carter	Kirpich	Diferença entre os valores (%)
SB1	40,69	33,03	18,82
SB2	22,21	15,08	32,08
SB3	23,46	15,58	33,60
SB4	25,83	19,41	24,86
SB5	37,01	28,13	24,02
B. Mineirinho	63,81	61,19	4,11

4.6.2 Determinação das chuvas de projeto

No presente estudo, utilizou-se a curva IDF proposta por Barbassa (1991) para o município de São Carlos. A equação, apresentada a seguir, relaciona a intensidade média da chuva, sua duração e período de retorno, período em que o evento é igualado ou superado, a partir da relação empírica para durações de 5 a 240 minutos.

$$i = \frac{1519 T^{0,236}}{(t + 16)^{0,935}}$$

Equação 18;

Na qual:

- i: intensidade (mm/h);
- T: período de retorno (anos);
- t: duração da chuva (min).

Foram analisadas chuvas com tempos de retorno de 5, 25, 50 e 100 anos e a duração da chuva de projeto foi determinada em função do tempo de concentração da bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho, calculado a partir das diferentes fórmulas (Carter e Kirpich). Como a duração da chuva de projeto deve ser maior ou igual ao tempo de concentração, adotou-se uma duração de 65 minutos para os dois casos.

4.6.3 Distribuição temporal da chuva

Com o cálculo da intensidade da chuva de projeto e sua duração, foi obtida a altura total precipitada. Assim, para se realizar a modelação, é necessário que haja uma distribuição temporal da altura precipitada. Para tanto, optou-se pelos métodos dos blocos alternados, Huff 1°. Quartil, Huff 2°. Quartil e *Bureau of Reclamation*. A distribuição temporal das alturas calculadas através da curva IDF proposta por Barbassa (1991) resultou nos hietogramas apresentados no Anexo A (Figuras 28 a 43).

4.7 Simulação hidrológica e análise de sensibilidade

As estimativas dos hidrogramas de cheias e respectivas vazões de pico foram realizadas com o modelo *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) desenvolvido pelo *U. S. Army Corps of Engineers*. Esse modelo emprega, entre outros, o método SCS para o cálculo da chuva excedente, e o método das relações adimensionais para o estabelecimento do Hidrograma Unitário Sintético, também desenvolvido pelo antigo SCS. A aplicação do modelo compreende, basicamente, as seguintes etapas:

- Estimativa da chuva de projeto com determinada duração para diferentes períodos de retorno e sua distribuição temporal;
- Levantamento das características físicas da bacia, como: área de drenagem, comprimento, tipo e uso e ocupação do solo;
- Estimativa da capacidade de infiltração dos solos, através do parâmetro CN;
- Cálculo da infiltração, do escoamento superficial direto e geração de hidrogramas de cheia.

O programa calcula a precipitação parcial durante uma tempestade recalculando o volume de infiltração no final de cada intervalo de tempo. Assim, a infiltração durante cada intervalo de tempo é a diferença de volume no final de dois intervalos de tempo adjacentes.

A Figura 14 ilustra o editor de componentes, no qual se deve digitar o *Curve Number*. Este deve ser um número que representa todas as diferentes combinações de grupos de solo e uso e ocupação do solo na sub-bacia. Ainda no editor de componentes, é possível,

opcionalmente, digitar uma perda inicial. Caso este valor seja deixado em branco, será automaticamente calculada como 0,2 vezes o potencial de retenção de água no solo “S”, que é calculado a partir do *Curve Number* (SCHARFFENBERG; FLEMING, 2010).

A Figura 15 ilustra o editor de componentes no qual se deve digitar o *lag time* ou tempo de retardo, tempo que vai do centro de massa do hietograma de chuva excedente até o pico do hidrograma, em minutos, o qual foi calculado para a fórmula de Kirpich, que calcula o tempo de concentração, como sendo igual a 0,6 vezes o tempo de concentração. A outra fórmula, de Carter, já calcula o *lag time* diretamente.

Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
SB1			
SB2			
SB4			
SB3			
SB5			

Figura 14 – Editor dos componentes do método SCS no HEC-HMS

Subbasin	Lag Time (MIN)
SB1	
SB2	
SB4	
SB3	
SB5	

Figura 15 – Editor dos componentes do método SCS no HEC-HMS

A sensibilidade do método SCS em relação ao CN, tempo de concentração e distribuição temporal da chuva foi analisada através dos resultados obtidos na simulação hidrológica. Para a análise do CN, o tempo de concentração obtido através de uma das fórmulas foi fixado. Do mesmo modo que para a análise dos diferentes resultados do tempo de concentração, os valores de CN foram fixados. A mesma sistemática foi adotada para a distribuição temporal da chuva.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 *Curve Number*

Para a análise da sensibilidade do método SCS em relação ao parâmetro *Curve Number* (CN), foram realizadas simulações hidrológicas fixando os parâmetros: distribuição temporal da chuva e tempo de concentração, e variando os valores de CN's. Os hidrogramas foram gerados utilizando o método dos Blocos Alternados para a distribuição temporal da chuva, a fórmula de Carter para cálculos dos tempos de concentração e os CN's obtidos a partir dos mapas de uso e ocupação do solo, gerados a partir das imagens de alta e baixa resolução.

Os resultados apresentados no Quadro 14 e Figura 16 são referentes às simulações com período de retorno igual a 100 anos. O Quadro 15 e Figura 17 para período de retorno igual a 50 anos. O Quadro 16 e Figura 18 e o Quadro 17 e Figura 19 apresentam os resultados para os períodos de retorno de 25 e 5 anos, respectivamente.

Quadro 14 – Resultados das simulações realizadas utilizando CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, com período de retorno igual a 100 anos

Elemento hidrológico	Tempo de Pico (horas:min) - CN imagem de alta resolução	Vazão de Pico (m ³ /s) - CN imagem de alta resolução	Tempo de Pico (horas:min) - CN imagem de baixa resolução	Vazão de pico (m ³ /s) - CN imagem de baixa resolução	Diferença entre as vazões (m ³ /s)	Diferença entre as vazões (%)
SB1	00:59	21,10	01:01	16,40	4,70	22,27
SB2	00:45	20,40	00:47	13,10	7,30	35,78
SB4	00:49	12,60	00:51	9,50	3,10	24,60
SB3	00:47	7,40	00:48	5,90	1,50	20,27
SB5	00:57	34,60	00:59	21,40	13,20	38,15
Exutório	00:53	87,70	00:54	60,40	27,30	31,13

Figura 16 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações a partir dos CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, para período de retorno de 100 anos

Quadro 15 – Resultados das simulações realizadas utilizando CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, com período de retorno igual a 50 anos

Elemento hidrológico	Tempo de Pico (horas:min) - CN imagem de alta resolução	Vazão de Pico (m ³ /s) - CN imagem de alta resolução	Tempo de Pico (horas:min) - CN imagem de baixa resolução	Vazão de pico (m ³ /s) - CN imagem de baixa resolução	Diferença entre as vazões (m ³ /s)	Diferença entre as vazões (%)
SB1	01:00	15,90	01:01	11,80	4,10	25,79
SB2	00:46	15,80	00:48	9,40	6,40	40,51
SB4	00:50	9,10	00:51	6,60	2,50	27,47
SB3	00:47	5,60	00:48	4,30	1,30	23,21
SB5	00:58	25,60	01:00	14,60	11,00	42,97
Exutório	00:53	65,50	00:55	42,50	23,00	35,11

Figura 17 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações a partir dos CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, para período de retorno de 50 anos

Quadro 16 – Resultados das simulações realizadas utilizando CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, com período de retorno igual a 25 anos

Elemento hidrológico	Tempo de Pico (horas:min) - CN imagem de alta resolução	Vazão de Pico (m ³ /s) - CN imagem de alta resolução	Tempo de Pico (horas:min) - CN imagem de baixa resolução	Vazão de pico (m ³ /s) - CN imagem de baixa resolução	Diferença entre as vazões (m ³ /s)	Diferença entre as vazões (%)
SB1	01:01	11,70	01:02	8,30	3,40	29,06
SB2	00:46	12,00	00:48	6,60	5,40	45,00
SB4	00:51	6,50	00:52	4,40	2,10	32,31
SB3	00:48	4,10	00:49	3,10	1,00	24,39
SB5	00:58	18,60	01:02	9,60	9,00	48,39
Exutório	00:54	48,00	00:56	29,00	19,00	39,58

Figura 18 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações a partir dos CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, para período de retorno de 25 anos

Quadro 17 – Resultados das simulações realizadas utilizando CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, com período de retorno igual a 5 anos

Elemento hidrológico	Tempo de Pico (horas:min) - CN imagem de alta resolução	Vazão de Pico (m ³ /s) - CN imagem de alta resolução	Tempo de Pico (horas:min) - CN imagem de baixa resolução	Vazão de pico (m ³ /s) - CN imagem de baixa resolução	Diferença entre as vazões (m ³ /s)	Diferença entre as vazões (%)
SB1	01:03	5,30	01:05	3,20	2,10	39,62
SB2	00:47	5,80	00:51	2,40	3,40	58,62
SB4	00:53	2,50	00:56	1,40	1,10	44,00
SB3	00:49	1,90	00:51	1,20	0,70	36,84
SB5	01:01	7,80	01:06	2,80	5,00	64,10
Exutório	00:56	21,10	01:00	10,10	11,00	52,13

Figura 19 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações a partir dos CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, para período de retorno de 5 anos

A partir dos resultados mostrados nos quadros e figuras anteriores, foi possível verificar que o método SCS apresenta-se bastante sensível em relação ao parâmetro CN, pois pequenas variações nesse número, que não ultrapassam 11,22 % (ver Quadro 19) geraram variações nas vazões de pico, no exutório da bacia, de **31,13; 35,11; 39,58 e 52,13 %**, para as simulações com período de retorno de 100, 50, 25 e 5 anos, respectivamente. Infere-se que as variações aumentam significativamente conforme o período de retorno diminui e que o uso de imagens de baixa resolução tende a subestimar o valor da vazão de pico. Verifica-se que como os tempos de concentração foram mantidos constantes, a forma dos hidrogramas é similar em todos os casos, e o volume do escoamento superficial direto é sistematicamente menor para os casos em que o CN foi calculado a partir da imagem de baixa resolução. O Quadro 18 mostra as diferenças, em porcentagem, entre os volumes resultantes das simulações utilizando os valores de CN's obtidos a partir da imagem de baixa e alta resolução para os diferentes períodos de retorno, no exutório da bacia. As diferenças nos volumes também são significativas; percentualmente, são da mesma ordem de grandeza das diferenças na vazão de pico e também aumentam conforme diminui o período de retorno.

Quadro 18 – Comparação dos volumes dos hidrogramas no exutório da bacia resultantes das simulações utilizando CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, para período os diferentes períodos de retorno

Período de Retorno	Volume no exutório (1000 m³) - CN imagem de alta resolução	Volume no exutório (1000 m³) - CN imagem de baixa resolução	Diferença entre os volumes (%)
T _R = 5 anos	55,15	27,46	50,21
T _R = 25 anos	122,06	75,11	38,47
T _R = 50 anos	165,46	108,91	34,18
T _R = 100 anos	220,21	153,42	30,33

O Quadro 19 mostra as diferenças, em porcentagem, entre os valores de CN obtidos a partir da imagem de baixa e alta resolução e as diferenças entre as vazões resultantes das simulações utilizando período de retorno igual a 5 anos (caso que se mostrou mais discrepante). As diferenças entre as vazões de pico são aproximadamente 6 (seis) vezes maiores que as diferenças entre os valores de CN's.

Quadro 19 – Comparação dos resultados das simulações realizadas utilizando CN's obtidos das imagens de alta e baixa resolução, para período de retorno igual a 5 anos

Sub-bacias	CN - Imagem Baixa Resolução	CN - Imagem Alta Resolução	Diferença entre os valores de CN (%)	Vazão de pico - Imagem Baixa Resolução	Vazão de pico - Imagem Alta Resolução	Diferença entre os valores de vazão (%)
SB1	76,64	81,81	6,33	3,20	5,30	39,62
SB2	76,35	85,47	10,66	2,40	5,80	58,62
SB4	72,49	77,68	6,68	1,40	2,50	44,00
SB3	77,82	82,24	5,37	1,20	1,90	36,84
SB5	71,10	80,08	11,22	2,80	7,80	64,10

5.2 Distribuição temporal da chuva

Para a análise da sensibilidade do método SCS em relação à distribuição temporal da chuva, foram realizadas simulações hidrológicas fixando os parâmetros: CN e tempo de concentração, e variando os métodos para a distribuição temporal da chuva. Os hidrogramas foram gerados utilizando os CN's obtidos a partir da imagem de alta resolução e tempos de concentração calculados com a fórmula de Carter. A precipitação foi distribuída conforme os métodos: Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil, Huff 2°. Quartil e *Bureau of Reclamation*.

Os resultados apresentados no Quadro 20 e Figura 20 são referentes às simulações com período de retorno igual a 100 anos. O Quadro 21 e Figura 21 apresentam resultados para período de retorno igual a 50 anos. O Quadro 22 e Figura 22 e o Quadro 23 e Figura 23 apresentam os resultados para os períodos de retorno de 25 e 5 anos, respectivamente.

Quadro 20 – Resultados das simulações realizadas utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil e Huff 2°. Quartil e *Bureau of Reclamation*, para período de retorno igual a 100 anos

Elemento hidrológico	Tempo de Pico (horas:min) - Blocos Alternados	Vazão de Pico (m³/s) - Blocos Alternados	Tempo de Pico (horas:min) - Huff 1°. Quartil	Vazão de pico (m³/s) - Huff 1°. Quartil	Tempo de Pico (horas:min) - Huff 2°. Quartil	Vazão de pico (m³/s) - Huff 2°. Quartil	Tempo de Pico (horas:min) - <i>Bureau of Reclamation</i>	Vazão de Pico (m³/s) - <i>Bureau of Reclamation</i>	Diferença entre as vazões (maior e menor) (%)	Diferença entre as vazões (Huff 2°. Quartil e Blocos Alternados) (%)
SB1	00:59	21,10	00:44	19,00	00:57	21,10	01:11	23,60	19,49	0,00
SB2	00:45	20,40	00:29	18,70	00:44	18,80	00:59	23,00	18,70	7,84
SB4	00:49	12,60	00:33	11,10	00:48	12,30	01:02	14,70	24,49	2,38
SB3	00:47	7,40	00:30	6,60	00:46	6,90	01:00	8,40	21,43	6,76
SB5	00:57	34,60	00:41	30,80	00:55	34,60	01:09	39,20	21,43	0,00
Exutório	00:53	87,70	00:37	78,10	00:52	87,80	01:05	99,90	21,82	-0,11

Figura 20 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil e Huff 2°. Quartil e Bureau of Reclamation, para período de retorno igual a 100 anos

Quadro 21 – Resultados das simulações realizadas utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil e Huff 2°. Quartil e *Bureau of Reclamation*, para período de retorno igual a 50 anos

Elemento hidrológico	Tempo de Pico (horas:min) - Blocos Alternados	Vazão de Pico (m³/s) - Blocos Alternados	Tempo de Pico (horas:min) - Huff 1°. Quartil	Vazão de pico (m³/s) - Huff 1°. Quartil	Tempo de Pico (horas:min) - Huff 2°. Quartil	Vazão de pico (m³/s) - Huff 2°. Quartil	Tempo de Pico (horas:min) - <i>Bureau of Reclamation</i>	Vazão de Pico (m³/s) - <i>Bureau of Reclamation</i>	Diferença entre as vazões (maior e menor) (%)	Diferença entre as vazões (Huff 2°. Quartil e Blocos Alternados) (%)
SB1	01:00	15,90	00:44	14,20	00:58	16,00	01:11	17,90	20,67	0,62
SB2	00:46	15,80	00:29	14,20	00:45	14,70	00:59	18,00	21,11	-7,48
SB4	00:50	9,10	00:34	8,00	00:49	9,00	01:03	10,80	25,93	-1,11
SB3	00:47	5,60	00:31	4,90	00:46	5,30	01:00	6,40	23,44	-5,66
SB5	00:58	25,60	00:42	22,60	00:56	25,80	01:09	29,30	22,87	0,78
Exutório	00:53	65,50	00:38	57,80	00:52	66,10	01:05	75,40	23,34	0,91

Figura 21 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1º. Quartil e Huff 2º. Quartil e Bureau of Reclamation, para período de retorno igual a 50 anos

Quadro 22 – Resultados das simulações realizadas utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil e Huff 2°. Quartil e *Bureau of Reclamation*, para período de retorno igual a 25 anos

Elemento hidrológico	Tempo de Pico (horas:min) - Blocos Alternados	Vazão de Pico (m³/s) - Blocos Alternados	Tempo de Pico (horas:min) - Huff 1°. Quartil	Vazão de pico (m³/s) - Huff 1°. Quartil	Tempo de Pico (horas:min) - Huff 2°. Quartil	Vazão de pico (m³/s) - Huff 2°. Quartil	Tempo de Pico (horas:min) - <i>Bureau of Reclamation</i>	Vazão de Pico (m³/s) - <i>Bureau of Reclamation</i>	Diferença entre as vazões (maior e menor) (%)	Diferença entre as vazões (Huff 2°. Quartil e Blocos Alternados) (%)
SB1	01:01	11,70	00:45	10,40	00:58	11,90	01:12	13,30	21,80	1,68
SB2	00:46	12,00	00:30	10,70	00:45	11,30	00:59	13,80	22,46	-6,19
SB4	00:51	6,50	00:35	5,60	00:50	6,50	01:03	7,80	28,21	0,00
SB3	00:48	4,10	00:32	3,60	00:47	4,00	01:01	4,80	25,00	-2,50
SB5	00:58	18,60	00:43	16,20	00:56	18,80	01:10	21,40	24,30	1,06
Exutório	00:54	48,00	00:38	42,00	00:53	48,90	01:06	55,70	24,60	1,84

Figura 22 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil e Huff 2°. Quartil e Bureau of Reclamation, para período de retorno igual a 25 anos

Quadro 23 – Resultados das simulações realizadas utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil e Huff 2°. Quartil e *Bureau of Reclamation*, para período de retorno igual a 5 anos

Elemento hidrológico	Tempo de Pico (horas:min) - Blocos Alternados	Vazão de Pico (m³/s) - Blocos Alternados	Tempo de Pico (horas:min) - Huff 1°. Quartil	Vazão de pico (m³/s) - Huff 1°. Quartil	Tempo de Pico (horas:min) - Huff 2°. Quartil	Vazão de pico (m³/s) - Huff 2°. Quartil	Tempo de Pico (horas:min) - <i>Bureau of Reclamation</i>	Vazão de Pico (m³/s) - <i>Bureau of Reclamation</i>	Diferença entre as vazões de pico (maior e menor) (%)	Diferença entre as vazões de pico (Huff 2°. Quartil e Blocos Alternados) (%)
SB1	01:03	5,30	00:48	4,60	01:00	5,40	01:13	6,10	24,59	1,85
SB2	00:47	5,80	00:31	5,10	00:47	5,70	01:00	7,00	27,14	-1,75
SB4	00:53	2,50	00:38	2,10	00:52	2,70	01:05	3,20	34,38	7,41
SB3	00:49	1,90	00:33	1,60	00:49	1,90	01:02	2,30	30,43	0,00
SB5	01:01	7,80	00:46	6,70	00:58	8,10	01:11	9,30	27,96	3,70
Exutório	00:56	21,10	00:41	18,00	00:54	22,00	01:07	25,10	28,29	4,09

Figura 23 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando os métodos: Blocos Alternados, Huff 1º. Quartil e Huff 2º. Quartil e Bureau of Reclamation, para período de retorno igual a 5 anos

A partir dos resultados obtidos verificou-se que o método SCS apresenta-se bastante sensível em relação ao método escolhido para a distribuição temporal da chuva, pois houve grandes variações entre as vazões de pico, tempos de pico e formas dos hidrogramas ao utilizar-se os métodos seleccionados. Para todos os períodos de retorno considerados, verifica-se que: a) Huff 1º. Quartil: vazão de pico e tempo de pico menores; b) Huff 2º. Quartil e Blocos Alternados: hidrogramas semelhantes e vazão de pico e tempo de pico intermediários; c) *Bureau of Reclamation*: e vazão de pico e tempo de pico maiores.

As diferenças verificadas entre os métodos de Huff 1º. Quartil e *Bureau of Reclamation*, nas vazões de pico (no exutório da bacia) foram de **21,82; 23,34; 24,60 e 28,29 %**, para as simulações com período de retorno de 100, 50, 25 e 5 anos, respectivamente.

Diferenças mínimas nas vazões de pico, não ultrapassando 4 % no exutório da bacia, e na forma do hidrograma ocorrem entre os métodos de Huff 2º. Quartil e dos Blocos Alternados.

Com relação aos tempos de pico, nota-se que, para todos os períodos de retorno, há grandes diferenças entre os métodos de Huff 1º Quartil e *Bureau of Reclamation*, entre 25 e 30 minutos. Já os métodos Huff 1º Quartil e dos Blocos Alternados apresentam tempos de pico quase coincidentes.

Como os valores de CN são constantes, para cada período de retorno, o volume do escoamento superficial direto não se altera, apenas a forma do hidrograma varia conforme a distribuição temporal de chuva adotada.

5.3 Tempo de concentração

Para a análise da sensibilidade do método SCS em relação ao tempo de concentração, foram realizadas simulações hidrológicas fixando os parâmetros: CN e distribuição temporal da chuva, e variando os valores obtidos para o tempo de concentração. Os hidrogramas foram gerados utilizando os CN's obtidos a partir da imagem de alta resolução. Foi adotado o método dos Blocos Alternados para distribuição temporal da chuva, e utilizadas as fórmulas de Carter e Kirpich, para cálculos dos tempos de concentração.

Os resultados apresentados no Quadro 24 e Figura 24 são referentes às simulações com período de retorno igual a 100 anos. O Quadro 25 e Figura 25 apresentam resultados para período de retorno igual a 50 anos. O Quadro 26 e Figura 26 e o Quadro 27 e Figura 27 apresentam os resultados para os períodos de retorno de 25 e 5 anos, respectivamente.

Quadro 24 – Resultados das simulações realizadas utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 100 anos

Elemento hidrológico	Tempo de Pico (horas:min) - Fórmula de Carter	Vazão de Pico (m ³ /s) - Fórmula de Carter	Tempo de Pico (horas:min) - Fórmula de Kirpich	Vazão de pico (m ³ /s) - Fórmula de Kirpich	Diferença entre as vazões de pico (m ³ /s)	Diferença entre as vazões de pico (%)
SB1	00:59	21,10	00:54	24,10	3,00	12,45
SB2	00:45	20,40	00:40	24,50	4,10	16,73
SB4	00:49	12,60	00:45	14,60	2,00	13,70
SB3	00:47	7,40	00:41	8,90	1,50	16,85
SB5	00:57	34,60	00:51	40,90	6,30	15,40
Exutório	00:53	87,70	00:47	100,30	12,60	12,56

Figura 24 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 100 anos

Quadro 25 – Resultados das simulações realizadas utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 50 anos

Elemento hidrológico	Tempo de Pico (horas:min) - Fórmula de Carter	Vazão de Pico (m ³ /s) - Fórmula de Carter	Tempo de Pico (horas:min) - Fórmula de Kirpich	Vazão de pico (m ³ /s) - Fórmula de Kirpich	Diferença entre as vazões (m ³ /s)	Diferença entre as vazões (%)
SB1	01:00	15,90	00:54	18,10	2,20	12,15
SB2	00:46	15,80	00:41	18,90	3,10	16,40
SB4	00:50	9,10	00:45	10,60	1,50	14,15
SB3	00:47	5,60	00:41	6,70	1,10	16,42
SB5	00:58	25,60	00:51	30,20	4,60	15,23
Exutório	00:53	65,50	00:48	74,80	9,30	12,43

Figura 25 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 50 anos

Quadro 26 – Resultados das simulações realizadas utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 25 anos

Elemento hidrológico	Tempo de Pico (horas:min) - Fórmula de Carter	Vazão de Pico (m ³ /s) - Fórmula de Carter	Tempo de Pico (horas:min) - Fórmula de Kirpich	Vazão de pico (m ³ /s) - Fórmula de Kirpich	Diferença entre as vazões (m ³ /s)	Diferença entre as vazões (%)
SB1	01:01	11,70	00:55	13,30	1,60	12,03
SB2	00:46	12,00	00:41	14,30	2,30	16,08
SB4	00:51	6,50	00:46	7,40	0,90	12,16
SB3	00:48	4,10	00:42	5,00	0,90	18,00
SB5	00:58	18,60	00:52	21,80	3,20	14,68
Exutório	00:54	48,00	00:49	54,60	6,60	12,09

Figura 26 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 25 anos

Quadro 27 – Resultados das simulações realizadas utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 5 anos

Elemento hidrológico	Tempo de Pico (horas:min) - Fórmula de Carter	Vazão de Pico (m ³ /s) - Fórmula de Carter	Tempo de Pico (horas:min) - Fórmula de Kirpich	Vazão de pico (m ³ /s) - Fórmula de Kirpich	Diferença entre as vazões (m ³ /s)	Diferença entre as vazões (%)
SB1	01:03	5,30	00:57	5,90	0,60	10,17
SB2	00:47	5,80	00:42	7,00	1,20	17,14
SB4	00:53	2,50	00:48	2,90	0,40	13,79
SB3	00:49	1,90	00:43	2,20	0,30	13,64
SB5	01:01	7,80	00:54	9,10	1,30	14,29
Exutório	00:56	21,10	00:51	23,80	2,70	11,34

Figura 27 – Hidrogramas no exutório da bacia do córrego do Mineirinho resultantes das simulações utilizando as fórmulas de Kirpich e Carter, para período de retorno igual a 5 anos

A partir dos resultados obtidos verificou-se que o método SCS apresenta-se igualmente sensível em relação à fórmula escolhida para o cálculo do tempo de concentração, pois houve variações entre as vazões de pico (no exutório da bacia) de **12,56; 12,43; 12,09; 11,34 %**, para as simulações com período de retorno de 100, 50, 25 e 5 anos, respectivamente, enquanto que a diferença entre os tempos de concentração da bacia do Mineirinho foi de apenas 4 % (ver Quadro 13). Infere-se ainda que as variações diminuem conforme o período de retorno diminui, porém tratam-se de variações pouco significativas.

Vale ressaltar que as diferenças entre os tempos de concentração das sub-bacias foram maiores, chegando a 33,60 % para a sub-bacia 3, porém, as diferenças nas vazões de pico das sub-bacias, não foram muito maiores que as diferenças no exutório.

Independente do período de retorno adotado, verificou-se que os hidrogramas gerados com base nos tempos de concentração calculados com a fórmula de Kirpich apresentam vazões de pico maiores e tempos de pico menores, quando comparados com os hidrogramas gerados a partir de tempos de concentração calculados utilizando-se a fórmula de Carter. Esse comportamento era esperado, uma vez que, conforme os resultados do Quadro 13, a fórmula de Kirpich produziu tempos de concentração menores que os calculados com a fórmula de Carter. Isso porque o volume de escoamento superficial não se altera com o tempo de concentração, mas a forma do hidrograma, sim; pois, segundo a formulação do hidrograma unitário triangular do SCS, quanto menor for o tempo de concentração, menores são o tempo de pico e o tempo de base do HUT.

6. CONCLUSÕES

Com o presente estudo pode-se concluir que o método SCS apresenta-se bastante sensível em relação aos três parâmetros analisados: *Curve Number*, distribuição temporal da chuva e tempo de concentração. Isso devido às grandes diferenças entre as vazões de pico resultantes das simulações realizadas utilizando-se diferentes tipos de imagens de satélite, para elaboração de mapas de usos e ocupação do solo e determinação do CN, diferentes fórmulas para cálculo do tempo de concentração e diferentes métodos para distribuição temporal da chuva. O período de retorno também influencia nas diferenças, pois em alguns casos essas aumentaram conforme o período de retorno diminuiu.

Tendo em vista a dificuldade de se realizar a calibração dos modelos, devido à falta de dados observados de chuva e vazão, a definição dos parâmetros de entrada destes deve ser realizada de forma criteriosa para que os mesmos se aproximem o máximo dos valores reais, pois pequenos erros nos parâmetros podem gerar grandes erros nos resultados.

As diferenças entre os valores de CN, obtidos a partir das imagens de alta e baixa resolução, foram as que resultaram em maiores diferenças nas vazões de pico. De acordo com os resultados encontrados, diferenças da ordem de 10 % nos valores de CN podem gerar discrepâncias em torno de 60 % nos picos dos hidrogramas. Os hidrogramas gerados com base em imagens de baixa resolução apresentaram sistematicamente picos de vazão e volumes menores. Como os volumes dos hidrogramas influenciam significativamente no dimensionamento de bacias de detenção e/ou retenção, "piscinões", a eficiência destas estruturas pode ser comprometida em função do tipo de imagem utilizada para definição do CN. As diferenças no pico de vazão e no volume do hidrograma, em função do valor de CN, são inversamente proporcionais ao aumento do período de retorno.

As diferenças entre os valores de CN ocorreram principalmente pelo nível de detalhamento permitido pela imagem de alta resolução nas áreas urbanas das sub-bacias, pois esta permite definir classes mais homogêneas, como "telhados", "vias pavimentadas", "solo exposto", etc.; do que as imagens de baixa resolução, na qual é possível identificar apenas a "área urbana" como um todo. Sendo assim, observa-se que a imagem de satélite de alta resolução constitui-se em uma ferramenta importante para realizar uma classificação mais precisa do uso e ocupação do solo das sub-bacias e, dessa forma, gerar valores de CN mais realistas.

Para se decidir se estas imagens são indispensáveis para a elaboração de estudos hidrológicos, seria necessário avaliar a viabilidade da aquisição deste tipo de imagem, relacionando seu custo com a precisão dos resultados e seu impacto no sub ou superdimensionamento das medidas de controle. Em casos que a única opção seja utilizar imagens de baixa resolução, é necessário lançar mão de outras ferramentas como: trabalhos de reconhecimento de campo mais minuciosos e levantamentos cadastrais, que indiquem, por exemplo, o que se encontra instalado nas bacias e os tipos de pavimentos. Estas ações provavelmente exigiriam mais tempo e também gerariam um determinado custo. O *Google Earth* apresenta-se na atualidade como uma ferramenta que pode auxiliar o processo de identificação dos usos e ocupação do solo de uma determinada área, porém não permite realizar uma classificação tão precisa.

Em relação aos métodos utilizados para distribuição temporal da chuva – Blocos Alternados, Huff 1°. Quartil, Huff 2°. Quartil e *Bureau of Reclamation* – observa-se que os resultados também são sensíveis à escolha do método. Foram constatadas diferenças significativas nas vazões de pico, em torno de 20 a 30%, quando se comparam os resultados obtidos pelos métodos Huff 1°. Quartil e *Bureau of Reclamation*. As diferenças também são maiores para períodos de retorno menores. Além disso, independente do período de retorno, a distribuição Huff 1°. Quartil resulta em vazões de pico e tempos de pico menores; as distribuições Huff 2°. Quartil e Blocos Alternados geram hidrogramas semelhantes com vazões de pico e tempos de pico intermediários; e a distribuição *Bureau of Reclamation* implica em vazões de pico e tempos de pico maiores. O mais adequado neste caso é procurar, na medida do possível, verificar qual distribuição empírica mais se aproxima da distribuição temporal local, com base em dados observados e/ou informações secundárias.

Sobre a escolha da fórmula para cálculo do tempo de concentração, tendo em vista que a maioria delas tem natureza empírica, conclui-se ser extremamente importante verificar se a área de estudo apresenta características similares às características do local para o qual a fórmula foi desenvolvida. Neste estudo, as duas fórmulas utilizadas, Kirpich e Carter, resultaram em hidrogramas cujas diferenças nas vazões de pico estão em torno de 12 %. Sendo que o uso da fórmula de Kirpich tende a produzir hidrogramas com picos maiores e tempos de pico menores. As diferenças encontradas não foram tão significativas, uma vez que as duas fórmulas são semelhantes e têm, como dados de entrada, declividades e extensões do sistema de drenagem. Há uma série de outras fórmulas de tempo de concentração que poderiam ser testadas, contudo optou-se por usar fórmulas recomendadas na literatura para bacias urbanas. Outro aspecto importante é a verificação das unidades dos parâmetros

definidas originalmente, no desenvolvimento da fórmula, para não se correr o risco de repetir erros de outros autores que tenham feito interpretações equivocadas. Além disso, se as sub-bacias que compõem a bacia objeto de estudo apresentam características diferentes entre si, é interessante avaliar a necessidade de se utilizar fórmulas diferentes para a determinação do tempo de concentração de cada sub-bacia. Uma bacia pode apresentar sub-bacias com características rurais e outras com características urbanas, e até mesmo sub-bacias com características mistas, ou com e sem estruturas de microdrenagem. Sendo assim, é importante avaliar cada sub-bacia e escolher a fórmula mais adequada em função de suas características específicas.

Todos os cuidados ajudam na diminuição das margens de erros e no dimensionamento de estruturas eficientes. Investimentos em estudos em bacias experimentais e redes hidrometereológicas poderiam diminuir gastos para a reconstrução de obras mal dimensionadas ou corrigir prejuízos causados pelas inundações.

7. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Para estudos futuros, recomendam-se os seguintes trabalhos:

- Comparar os hidrogramas sintéticos com hidrogramas observados, para avaliar quais fórmulas, métodos ou imagens são mais adequados para a realização de estudos hidrológicos em bacias sem dados observados;
- Testar outras fórmulas de tempo de concentração e comparar com o tempo de concentração obtido a partir de dados observados;
- Testar outros métodos para distribuição temporal da chuva e comparar com a distribuição obtida a partir de dados observados;
- Ampliar a análise da classificação do uso do solo com base em outras imagens e técnicas de interpretação; e avaliar a viabilidade de utilizar-se o *Google Earth* como ferramenta para classificação dos usos e ocupação do solo;
- Comparar os resultados obtidos nas simulações utilizando-se o método SCS com os obtidos a partir de outros modelos de geração de hidrogramas;
- Realizar estudo comparativo entre as cotas de inundação obtidas utilizando-se CN's de imagens de alta e baixa resolução;
- Avaliar o impacto da diferença dos hidrogramas no dimensionamento de obras como: canais, reservatórios de detenção/retenção, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, R. Calibration of the Soil Conservation Services (SCS) Method in Peninsular Malaysia Using Sungai Tasoh Catchment, Negeri Pelis. **1st International Conference on Managing Rivers in the 21st Century: Issues & Challenges**, 2004.

APRÍGIO, P. O. **Avaliação de Modelos de Simulação de Cargas Difusas em Bacias Urbanas**. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

BARBASSA, A. P. **Simulação do efeito da urbanização sobre a drenagem pluvial na cidade de São Carlos/SP**. 327p. Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

BESKOW, S; MELLO, C. R. de; COELHO, G.; SILVA, A. M. da; VIOLA, M. R. Estimativa do Escoamento Superficial em uma Bacia Hidrográfica com base em Modelagem Dinâmica e Distribuída. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** vol.33 nº1, Viçosa Jan./Feb. 2009.

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

CARTER, R.W., **Magnitude and Frequency of Floods in Suburban Areas**. U. S. Geological Survey, Prof. Paper 424-B, B9-B11, 1961.

DECINA, T. G. T. **Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, São Carlos – SP**. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

DESHMUKH, D. S.; CHAUBE U. C.; HAILU A. E.; GUDETA D. A.; KASSA M. T. Estimation and comparison of curve numbers based on dynamic land use land cover change, observed rainfall-runoff data and land slope. **Journal of Hydrology**. V. 492, p. 89–101, 2013.

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.

DURIEUX, L.; LAGABRIELLE, E.; NELSON, A. A method for monitoring building construction in urban sprawl areas using object-based analysis of spot 5 images and existing GIS data. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, Pequim, v.63, n.4, p.399-408, 2008.

FRAUMAN, F.; WOLFF, E. Change detection in urban areas using very high spatial resolution satellite images - Case study in Brussels: locating main changes in order to update the Urban Information System. **AM/FM-GIS Belux**, n. 32, p. 9-14. Bruxelas, 2005.

GENOVEZ, A. M. Vazões Máximas. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

HAWKINS, R. H. et al. **Curve Number Hydrology: State of the Practice**. Virginia: ASCE, 2009.

HJELMFELT, A. T. Jr.; CASSIDY, J. J. **Hydrology for Engineers and Planners**. Iowa State University Press, 210p. Ames - Iowa, 1975.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Banco de Dados: IBGE Países**, 2012. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/paisesat/main_frameset.php>. Acesso em: 21 de abril de 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. 219 p. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 21 de abril de 2014.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Catálogo de Imagens**. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 01 de outubro de 2013.

ISIK, S.; KALIN, L.; SCHOONOVER, J. E.; SRIVASTAVA P. LOCKABY, B. G. Modeling effects of changing land use/cover on daily streamflow: An Artificial Neural Network and curve number based hybrid approach. **Journal of Hydrology**, vol. 485, p. 103-112, 2013.

JACQUIN, A.; MISAKOVA, L.; GAY, M. A hybrid object-based classification approach for mapping urban sprawl in periurban environment. **Landscape and Urban Planning**, v. 84, n. 2, p. 152-165, Amsterdam: ELSEVIER, 2008.

KABIRI, R.; CHAN, A.; BAI, R. Comparison of SCS and Green-Ampt Methods in Surface Runoff-Flooding Simulation for Klang Watershed in Malaysia. **Open Journal of Modern Hydrology**, vol. 3, p. 102-114, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/ojmh.2013.33014>>

KIRPICH, Z. P. **Time of concentration of small agricultural watersheds**. Civil Engineering, v. 10, n°6. 1940. 362 p.

LORANDI, R. **Caracterização dos solos das áreas urbana e suburbana de São Carlos (SP) e suas aplicações**. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba – ESALQ - USP. 181p (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), 1985.

LOU, R. F. **Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão e Hidrodinâmica Aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabanha/RJ**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 174p (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil), 2010.

MARTINS, L. G. B. **Determinação de parâmetros hidrológicos por técnicas de sensoriamento remoto em macrodrenagem urbana**. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MCCUEN, R. H. **A guide to Hydrologic Analysis Using SCS Method**. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 1982.145p.

MCCUEN, R.H.; WONG, S.L.; RAWLS, W.J. Estimating Urban Time of Concentration. **Journal of Hydraulic Engineering**, vol. 110, n° 7, ASCE, p. 887-904, 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, 17-27, 2007.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**, Brasília. UNB – CNPq, p 1-276, 2012.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Plano Nacional de Saneamento Básico**, 2013. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/plansab_06-12-2013.pdf>. Acesso em: 21 de abril de 2014.

MISHRA, S.K.; SINGH, V.P.; SANSALONE, J.J. e ARAVAMUTHAN, V. A modified SCS-CN method: Characterization and testing. **Water Res. Manag.**, 17:37-68, 2003.

NAYAK T; VERMA M. K, HEMA BINDU. S. SCS curve number method in Narmada basin, **International Journal of Geomatics and Geosciences**, v. 3, n. 1 219-228, 2012.

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.

POMPÊO, C. A. **Sistemas Urbanos de Microdrenagem**. Notas de aula, Florianópolis, 2001.
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.107-166.

RAMOS, C. L; BARROS, M. T. L.; PALOS, J. C. F., coord. **Diretrizes Básicas para Projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo**. Prefeitura do Município de São Paulo e Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica - CTH, São Paulo, 1999. Disponível em: http://www.fau.usp.br/docentes/deptecnologia/r_toledo/3textos/07drenag/dren-sp.pdf.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 10, n. 4, p. 5-18, 2005.

SCHAAKE, J. C., GEYER, J. C., KNAPP, J. W. Experimental Examination of the Rational Method, **Journal of Hydraulics Division**, ASCE, vol. 93, N°.HY6, nov. , p. 353-370, 1967.

SCHARFFENBERG, W. A., FLEMING, M. J. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. **User's Manual**. U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, 2010.

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

SILVEIRA, G. M. da. **Análise de Sensibilidade de Hidrogramas de Projeto aos Parâmetros de sua Definição Indireta**. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

TIECHER, T.; TASSI, R.; TASSINARI, L.C. da S.; SANTOS, D. R. dos. Análise do Padrão de Distribuição Temporal das Chuvas em Santa Maria. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves, 1-8, 2013.

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

TUCCI, C. E. M; BERTONI, J. C. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH, 2001.

USBR U. S. Bureau of Reclamation - United States Department of the interior - **Design of Small Dams**. Companhia Editorial Continental S.A México, D. F. 1977. 639 p.

USDA U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE). **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Natural Resources Conservation Service. Technical Release 55. Washington: USDA, 1986.

ZAHED FILHO, K. Precipitações Máximas. In: BARROS, M.T.; PORTO, R.L; TUCCI, C.E.M (Organizadores). **Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH, 1995. Cap.2, p. 37-76.

WILKEN, Paulo Sampaio. **Engenharia de Drenagem Superficial**. São Paulo, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), 1978. 478 p.

APÊNDICE A – Valores de CN para diferentes tipos de uso do solo (USDA, 1986)

Tabela 1 – Valores de CN para áreas urbanas

Cover type and hydrologic condition	Average percent impervious area ⁴	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, no vegetation)		77	86	91	94

⁴ 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 2 – Valores de CN para áreas agrícolas

Cover description			Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Treatment ⁵	Hydrologic condition ⁶	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 row (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
	Contoured and 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

⁵ Crop residue cover applies only if residue is on at least 5% of the surface throughout the year

⁶ 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 = 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 3 – Valores de CN para outros tipos de áreas agrícolas

Cover description		Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Hydrologic condition	A	B	C	D
Pasture, grassland, or range – continuous forage for grazing. ⁷	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 ⁸	58	71	78
Brush – brush-weed-grass mixture with brush the major element. ⁹	Poor	48	67	77	83
	Fair	35	56	70	77
	Good	30	48	65	73
Woods- grass combination (orchard or tree farm). ¹⁰	Poor	57	73	82	86
	Fair	43	65	76	82
	Good	32	58	72	79
Woods. ¹¹	Poor	45	66	77	83
	Fair	36	60	73	79
	Good	30 ⁵	55	70	77
Farmsteads – buildings, lanes, driveways, and surrounding lots.	-	59	74	82	86

⁷ 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.

⁸ Actual curve number is less than 30; use CN = 30 for runoff computations

⁹ Poor: < 50% ground cover.

Fair: 50 to 75% ground cover.

Good: > 75% ground cover.

¹⁰ 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.

¹¹ 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.

Tabela 4 – Valores de CN para regiões áridas e semiáridas

Cover description		Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Hydrologic condition ¹²	A ¹³	B	C	D
Herbaceous – mixture of grass, weeds, and low-growing brush, with brush the minor element.	Poor		80	87	93
	Fair		71	81	89
	Good		62	74	85
Oak-aspen – mountain brush mixture of oak brush, aspen, mountain mahogany, bitter brush, maple, and other brush.	Poor		66	74	79
	Fair		48	57	63
	Good		30	41	48
Pinyon-juniper – pinyon, juniper, of both; grass understory.	Poor		75	85	89
	Fair		58	73	80
	Good		41	61	71
Sagebrush with grass understory.	Poor		67	80	85
	Fair		51	63	70
	Good		35	47	55
Desert shrub – major plants include saltbrush, greasewood, creosotebush, blackbrush, bursage, palo verde, mesquite, and cactus	Poor	63	77	85	88
	Fair	55	72	81	86
	Good	49	68	79	84

¹²Poor: < 30% ground cover (litter, grass, and brush overstory).

Fair: 30 to 70% ground cover.

Good: > 70% ground cover.

¹³Curve numbers for group A have been developed only for desert shrub.

ANEXO A – Hietogramas da chuva de projeto

Figura 28 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 100 anos – Blocos Alternados –
Duração da chuva igual a 65 minutos

Figura 29 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 50 anos – Blocos Alternados – Duração da chuva igual a 65 minutos

Figura 30 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 25 anos – Blocos Alternados – Duração da chuva igual a 65 minutos

Figura 31 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 5 anos – Blocos Alternados – Duração da chuva igual a 65 minutos

Figura 32 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 100 anos – Huff 1º. Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos

Figura 33 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 50 anos – Huff 1º. Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos

Figura 34 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 25 anos – Huff 1º. Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos

Figura 35 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 5 anos – Huff 1º. Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos

Figura 36 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 100 anos – Huff 2º. Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos

Figura 37 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 50 anos – Huff 2º. Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos

Figura 38 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 25 anos – Huff 2º. Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos

Figura 39 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 5 anos – Huff 2º. Quartil – Duração da chuva igual a 65 minutos

Figura 40 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 100 anos – Bureau of Reclamation –
Duração da chuva igual a 65 minutos

Figura 41 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 50 anos – Bureau of Reclamation –
Duração da chuva igual a 65 minutos

Figura 42 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 25 anos – Bureau of Reclamation –
Duração da chuva igual a 65 minutos

Figura 43 – Hietograma da Chuva de Projeto com Período de Retorno de 5 anos – Bureau of Reclamation –
Duração da chuva igual a 65 minutos