



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
- MESTRADO -

ABORDAGEM DISTRIBUÍDA PARA SIMULAÇÃO
CHUVA – VAZÃO EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

Por

Fagner França da Costa

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção
do grau de Mestre



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
- MESTRADO -

ABORDAGEM DISTRIBUÍDA PARA SIMULAÇÃO
CHUVA – VAZÃO EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Fagner França da Costa

Orientador: Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz

C837a Costa, Fagner França da.

Abordagem distribuída para simulação chuva-vazão em pequenas bacias hidrográficas / Fagner França da Costa. - João Pessoa, 2017.

124 f. : il. -

Orientador: Adriano Rolim da Paz.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT

1. Drenagem Urbana. 2. Modelagem Hidrológica Distribuída. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Geoprocessamento. I. Título.

UFPB/BC

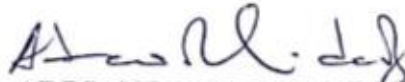
CDU: 626.86(043)

FAGNER FRANÇA DA COSTA

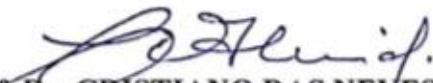
**ABORDAGEM DISTRIBUÍDA PARA SIMULAÇÃO
CHUVA – VAZÃO EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Dissertação aprovada em 08/06/2017 como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pelo Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. ADRIANO ROLIM DA PAZ - UFPB
(Orientador)



Prof. Dr. CRISTIANO DAS NEVES ALMEIDA - UFPB
(Membro Interno)



Prof. Dr. DANIEL GUSTAVO ALLASIA PICCILLI - UFSM
(Membro Externo)

“Existe uma herança de deus separada para cada um de nós, existe um propósito, para mim e para você, creia. ”

Regis Danese

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por ter me guiado até a realização desse sonho;

À minha família, em especial aos meus pais Martinho Costa e Margarida Costa, pelo apoio e incentivo nos momentos de dificuldades;

Aos meus irmãos, em especial a minha irmã Adriana Costa e seu esposo Humberto Cabral, pelo acolhimento em sua residência;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo;

Ao Departamento de Águas Pluviais do município de Porto Alegre – RS, em especial da pessoa de Stanley Amaral;

Ao professor Daniel Picilli da Universidade Federal de Santa Maria, pelo fornecimento de algumas informações referentes às características físicas da bacia hidrográfica estudada;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil e Ambiental (PPGE-CAM/UFPB) pelos conhecimentos transmitidos;

Ao Prof. Dr. Adriano Paz pela sua paciência, amizade, confiança e orientação na realização desta pesquisa;

Aos meus colegas da turma do mestrado, em especial das pessoas de Eliamin, Geraldo, Icaro, Lucila, Paloma, Marie e Samir, pelo convívio, lições e amizades;

Ao grupo de pesquisa na qual estive inserido, em especial das pessoas de Lais Paulino e Victoria Castro, pela amizade e suporte;

Enfim, a todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

RESUMO

As inundações urbanas são um problema recorrente no Brasil, devido principalmente à gestão e ao planejamento inadequado dos sistemas de drenagem de águas pluviais. Para mitigar tais efeitos, obras hidráulicas são projetadas com base em dados de precipitação que, pela sua vez, são utilizados para estimativa de vazão em modelos hidrológicos. A utilização de modelos empíricos adaptados especificamente para estimativas do escoamento superficial tem sido utilizada com frequência em regiões onde não há informações hidrológicas. Recentemente têm sido desenvolvidos modelos hidrológicos que incorporam a variabilidade espacial das características físicas das bacias hidrográficas. O emprego de ferramentas computacionais para otimização dos processos de análise, definição e gerenciamento dos recursos hídricos são cada vez mais comuns. Geralmente, estas ferramentas utilizam uma série de modelos matemáticos e de simulação hidrológica e hidrogeológica. Este trabalho analisa a incorporação das características físicas de uma bacia hidrográfica urbana a partir da adaptação do modelo da curva número e do hidrograma unitário sintético triangular, ambos propostos pelo *Natural Resource Conservation Service* (NRCS). As alternativas incorporadas abrangem a utilização dessas metodologias de forma a simular os processos hidrológicos em nível de pixel. O modelo proposto foi aplicado no Arroio Cascata I, localizada no município de Porto Alegre – RS, escolhida em função da disponibilidade de dados observados de precipitação e de vazão. Os resultados apontam que a abordagem distribuída apresenta característica de superestimar as vazões de pico e subestimar os tempos de pico. Contudo, a calibração validou o modelo distribuído, ao gerar boas alternativas para a estimativa de escoamento superficial em nível de pixel. Apresentando em média seu melhor resultado quando aplicado o hidrograma HU_{jus} , em conjunto com as combinações de 0,05 para as perdas iniciais e 0,45 para o fator de tempo de pico. Não sendo descartado os resultados das simulações realizadas pelo o hidrograma distribuído HU_{exe} .

PALAVRAS CHAVES: Modelagem hidrológica distribuída, Drenagem urbana, Sensoriamento remoto e Geoprocessamento

ABSTRACT

Urban floods are a constant problem in Brazil, mainly due to inadequate management and planning of rainwater drainage systems. To mitigate such effects, hydraulic works are projected based on precipitation data, which, in turn, are used for flow estimation in hydrological models. The use of empirical models specifically tailored to surface estimates has been frequently used in regions where there is no hydrological information. Recently, hydrological models have been developed that incorporate the spatial variability of the physical characteristics of the river basins. The use of computational tools to optimize the processes of analysis, definition and management of water resources are increasingly common. Generally, these tools use a series of mathematical models and hydrological and hydrogeological simulation. This work analyzes the incorporation of the physical characteristics of a urban water basin from the adaptation of the curve number model and the triangular synthetic unit hydrograph, both proposed by the *Natural Resource Conservation Service* (NRCS). The incorporated alternatives cover the use of these methodologies in order to simulate the hydrological processes at the pixel level. The proposed model was applied in Arroio Cascata I, located in the city of Porto Alegre - RS, chosen according to the availability of observed precipitation and flow data. The results indicate that the distributed approach has the characteristic of overestimating the peak flows and underestimating the peak times. However, the calibration validated the distributed model, by generating good alternatives for the estimation of surface flow at the pixel level. It presents, on average, its best result when applied to the hydrograph HU_{jus}, together with combinations of 0,05 for the initial losses and 0,45 for the time to peak factor. Not being discarded the results of the simulations carried out by the distributed hydrograph HU_{exe}.

KEYWORDS: Distributed hydrological modeling, Urban drainage, Remote sensing and Geoprocessing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Análise comparativa de hidrogramas em diferentes cenários de ocupação de uma bacia hidrográfica	23
Figura 2 - Representação do método do gráfico	25
Figura 3 - Separação dos escoamentos pelos métodos do IF (a), IM (b) e ML (c)	27
Figura 4 - Princípio da proporcionalidade na teoria do hidrograma unitário	34
Figura 5 - Princípio da superposição na teoria do hidrograma unitário	35
Figura 6 - Hidrograma unitário sintético triangular do NRCS	36
Figura 7 - Hidrograma unitário sintético triangular do NRCS discretizado	39
Figura 8 - Efeito da resolução da imagem no hidrograma resultante	43
Figura 9 - Efeito do hidrograma resultante conforme a metodologia de distribuição temporal da precipitação	44
Figura 10 - Principais formas de discretização de modelos hidrológicos	45
Figura 11 - Esquema representativo de agregação do escoamento	48
Figura 12 - Distribuição da impermeabilidade em diferentes cenários: (a) atual, (b) agregação de canais, (c) agregação de mananciais e (d) uniformidade	49
Figura 13 - Localização dos Arroios Dilúvio e Cascata I	51
Figura 14 – Localização dos linígrafos e pluviógrafos ao longo do Arroio Dilúvio	52
Figura 15 - Fluxograma das principais etapas metodológicas	53
Figura 16 - MDE dos Arroios Dilúvio e Cascata I	54
Figura 17 - Direções de fluxo do Arroio Cascata I	55
Figura 18 - Esquema representativo de traçado das direções de fluxo	55
Figura 19 - Características de uso do solo dos Arroios Dilúvio e Cascata I	57
Figura 20 - Grupo hidrológico dos solos dos Arroios Dilúvio e Cascata I	59
Figura 21 - Exemplo de obtenção da declividade	62
Figura 22 - Divisão das classes dos trechos e subtrechos dos canais do Arroio Cascata I	63
Figura 23 - Mapa de CNs do Arroio Cascata I	65
Figura 24 - Esquema representativo da variante HUexe do método do hidrograma unitário distribuído	66
Figura 25 - Esquema representativo da variante HUjus do método do hidrograma unitário distribuído	67
Figura 26 - Esquema representativo de obtenção do escoamento superficial	71

Figura 27 - Interface do programa de obtenção dos escoamentos e demais características.....	72
Figura 28 - Separação dos escoamentos superficial e subterrâneo.....	74
Figura 29 - Diagrama de dispersão dos eventos	76
Figura 30 - Volume precipitado e escoado superficialmente sobre o Arroio Cascata I.....	77
Figura 31 - Mapa do tempo de deslocamento pelas superfícies de cada pixel em relação ao exutório.....	78
Figura 32 - Mapa do tempo de deslocamento pelos canais desde cada pixel ao exutório.....	78
Figura 33 - Mapa dos comprimentos dos cursos dos rios desde cada pixel ao exutório	79
Figura 34 - Tempo de deslocamento total de cada pixel ao exutório estimado para o evento datado de 12/12/1979	80
Figura 35 - Tempo de deslocamento total de cada pixel ao exutório para os demais eventos .	80
Figura 36 - Mapa de declividade da superfície de cada pixel	81
Figura 37 - Mapa de armazenamento máximo	82
Figura 38 - Mapa de perdas iniciais antes da calibração	82
Figura 39 - Mapas de precipitação excedente acumulada total por pixel do evento datado de 31/08/1980.....	84
Figura 40 - Mapas de precipitação excedente acumulada total por pixel do evento datado de 16/02/1980.....	84
Figura 41 - Mapas de precipitação excedente acumulada total por pixel do evento datado de 12/12/1979.....	84
Figura 42 - Comparação das vazões de pico simuladas pelos os tipos de HU distribuídos	87
Figura 43 - Comparação entre hidrogramas observados e simulados utilizando abordagem NRCS-CN-HUexe	88
Figura 44 - Comparação entre hidrogramas observados e simulados utilizando abordagem NRCS-CN-HUjus	89
Figura 45 - Erros relativos do tempo de pico (Tp) utilizando o método NRCS-CN-HUexe para os sete eventos da calibração em função da variação dos parâmetros perdas iniciais (percentual de S) e fator de tempo de pico	91
Figura 46 - Erros relativos da vazão de pico (Qp) utilizando o método NRCS-CN-HUexe para os sete eventos da calibração em função da variação dos parâmetros perdas iniciais (percentual de S) e fator de tempo de pico	92
Figura 47 - Erros relativos do tempo de pico (Tp) utilizando o método NRCS-CN-HUjus para os sete eventos da calibração em função da variação dos parâmetros perdas iniciais (percentual de S) e fator de tempo de pico	93

Figura 48 - Erros relativos da vazão de pico (Q_p) utilizando o método NRCS-CN-HUjus para os sete eventos da calibração em função da variação dos parâmetros perdas iniciais (percentual de S) e fator de tempo de pico 94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais causas e efeitos da urbanização sobre o sistema de drenagem urbana ...	24
Tabela 2 - Condições de umidade antecedente do solo	29
Tabela 3 - Grupos hidrológicos dos solos considerados no método NRCS-CN	29
Tabela 4 - Valores do parâmetro CN para áreas agrícolas no método NRCS-CN.....	30
Tabela 5 - Valores do parâmetro CN para áreas urbanas no método NRCS-CN.....	31
Tabela 6 - Correção dos valores de CN de acordo com a umidade antecedente do solo	32
Tabela 7 - Equações empíricas de convenção do parâmetro CN	32
Tabela 8 - Processo de convolução na teoria do hidrograma unitário	40
Tabela 9 - Comparação das simulações realizadas utilizando CNs obtidos a partir de imagens de alta e de baixa resolução considerando um Tr de 5 anos.....	43
Tabela 10 - Comparação do percentual de erro dos parâmetros Qp e Tp	49
Tabela 11 - Porcentagem de uso do solo do Arroio Dilúvio	57
Tabela 12 - Valores de MANNING para diferentes tipos de superfície ou revestimento de canais	64
Tabela 13 - Valores de CNs da bacia hidrográfica Cascata I de acordo com o grupo hidrológico dos solos	65
Tabela 14 - Principais arquivos de entrada para obtenção do hidrograma resultante total	68
Tabela 15 - Matriz de combinações dos parâmetros utilizados para calibração	70
Tabela 16 - Característica dos eventos selecionados do Arroio Cascata I	75
Tabela 17 - Resultados dos parâmetros do modelo NRCS-CN em sua abordagem tradicional	83
Tabela 18 - Erros relativos da vazão de pico (Qp), tempo de pico (Tp) e volume escoado (V) para a simulação com o método NRCS-CN-HUexe, simulando com os valores padrão dos parâmetros	85
Tabela 19 - Erros relativos da vazão de pico (Qp), tempo de pico (Tp) e volume escoado (V) para a simulação com o método NRCS-CN-HUjus, simulando com os valores padrão dos parâmetros	85
Tabela 20 - Erros relativos da vazão de pico (Qp), tempo de pico (Tp) e volume escoado (V) para a simulação com o método NRCS-CN-HUexe, simulando com os valores calibrados dos parâmetros	86

Tabela 21 - Erros relativos da vazão de pico (Q_p), tempo de pico (T_p) e volume escoado (V) para a simulação com o método NRCS-CN-HUjus, simulando com os valores calibrados dos parâmetros	86
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DPI	Divisão de Processamento de Imagens
DSG	Diretoria de Serviço Geográfico do Exército
GLCF	Global Land Cover
GLUE	Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
HU	Hidrograma Unitário
HUG	Hidrograma Unitário Geomorfológico
HUIG	Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico
HUS	Hidrograma Unitário Sintético
HUT	Hidrograma Unitário Triangular
HUSD	Hidrograma Unitário Espacialmente Distribuído
MDE	Modelo Digital de Elevação
MNT	Modelo Numérico do Terreno
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NRCS	Natural Resource Conservation Service
SCEM	Shuffled Complex Evolution Metropolis
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
USDA	United States Department of Agriculture
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transversal de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS E NOTAÇÕES

A	Área
b	Largura do canal
BFI_{max}	Máximo percentual de escoamento subterrâneo
b_i	Vazão subterrânea no instante i
CN	Parâmetro adimensional
C_p	Cota do pixel
d	Duração
h	Altura do canal
h_{exc}	Lâmina precipitada excedente
HU_{exe}	Hidrograma unitário distribuído tipo 1
HU_{jus}	Hidrograma unitário distribuído tipo 2
HU_{pixel}	Hidrograma unitário do pixel
i	Intensidade
k	Constante de recessão
km	Quilômetro
L	Comprimento
P	Precipitação
P_{24}	Precipitação com 24 horas de duração
η	Coefficiente de rugosidade de MANNING
Q	Vazão
Q_p	Vazão de pico
$q(t)$	Vazão no tempo t
Q_{90}, Q_{50}	Vazões de referência
R_h	Raio hidráulico
S	Armazenamento
S_p	Declividade no pixel
t	Tempo
t_b	Tempo de base
t_c	Tempo de concentração
t_{dc}	Tempo de deslocamento no canal
t_{ds}	Tempo de deslocamento na superfície

t_p	Tempo de pico
T_r	Período de retorno
T_T	Tempo de deslocamento total
t_{ve}	Tempo de viagem do pixel em relação ao exutório
t_{vj}	Tempo de viagem do pixel em relação ao pixel jusante
Δt	Variação do intervalo
V	Velocidade
y_i	Vazão observada no instante i

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS E NOTAÇÕES.....	x
1. INTRODUÇÃO	19
1.1. OBJETIVOS.....	22
1.1.1. Geral.....	22
1.1.2. Específicos.....	22
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1. Efeito da urbanização em bacias hidrográficas.....	23
2.2. Métodos de separação dos escoamentos	24
2.3. Transformação chuva-vazão pelo método NRCS-CN-HU	28
2.3.1. Método da precipitação excedente	28
2.3.2. Teoria do hidrograma unitário	33
2.3.3. Teoria do hidrograma unitário sintético	36
2.3.4. Exemplos de aplicações	41
2.4. Abordagem distribuída para modelagem chuva-vazão.....	45
3. METODOLOGIA	51
3.1. Área de estudo	51
3.2. Dados hidrológicos	52
3.3. Visão geral	53

3.4.	Modelo digital de elevação: fonte de dados e processamento inicial	54
3.5.	Mapas de uso e grupo hidrológico dos solos	56
3.6.	Adaptação do modelo NRCS-CN-HU	59
3.7.	Ajuste do modelo distribuído.....	69
3.8.	Separação dos escoamentos	71
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
4.1.	Obtenção dos hidrogramas das vazões observadas e caracterização dos eventos	74
4.2.	Tempo de percurso do escoamento superficial	77
4.3.	Precipitação excedente.....	81
4.4.	Análise de hidrogramas resultantes	85
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	95
5.1.	Conclusões	95
5.2.	Recomendações	96
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
APÊNDICE A		
APÊNDICE B		

1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento da população urbana nas últimas décadas, bem como a falta de políticas públicas voltadas ao planejamento e gestão de sistemas de drenagem urbana, tem contribuído para o aumento de áreas impermeáveis, apontada como uma das causas na geração de cheia em áreas susceptíveis de inundação, causando grandes transtornos para a maioria da população brasileira. Fato é que o crescente aumento das áreas urbanas vem apresentando influências diversas sobre a morfologia, uso do solo e a cobertura vegetal, características estas que afetam os processos naturais em áreas urbanas (Fares et al., 2014; Targ et al., 2012; Fritzen e Binda, 2011; Mejia e Moglen, 2010; Santos, 2006; Moraes, 2003; Silveira e Desbordes, 1999).

Segundo Tucci, Porto e Barros (1995) este fenômeno é um dos principais causadores de desastres, podendo ocorrer tanto pela ocupação desordenada da população em áreas ribeirinhas, como pelo processo natural. Como consequência, tais transtornos interferem diretamente no escoamento superficial, ocasionando aumento de velocidade e consequentemente diminuição do tempo de contribuição da bacia hidrográfica (Sheng e Wilson, 2009).

Especificamente a análise criteriosa do escoamento superficial, que inclui a determinação da vazão de pico, o volume, a forma do hidrograma e o período de retorno a eles associados, constitui um dos fatores chaves para o sucesso de um projeto de drenagem urbana (diques, canais e outras estruturas hidráulicas). Nesse aspecto, erros cometidos nessa fase poderão introduzir incoerências no planejamento da bacia hidrográfica (Tucci, Porto e Barros, 1995).

Várias são as metodologias, desde as mais simples às mais complexas, voltadas à simulação chuva-vazão que vêm sendo empregadas para melhor entendimento dos fenômenos físicos envolvidos em uma bacia hidrográfica em resposta a um dado evento hidrológico, principalmente no que diz respeito à simulação de cenários de uso do solo, haja vista que tais cenários influenciam diretamente na geração de escoamento (Fares et al., 2014; Silveira e Desbordes, 1999).

Em sua grande maioria, tais metodologias consideram na sua concepção original, a bacia hidrográfica de forma concentrada, isto é, não levando em conta a variabilidade espacial das características físicas da bacia hidrográfica. Características estas que, em maior ou menor grau,

podem influenciar as condições do escoamento e, conseqüentemente, influenciando diretamente na forma do hidrograma (Snyder, 1938 ¹*apud* Narayan et al., 2012).

Várias abordagens têm sido desenvolvidas para analisar a influência da heterogeneidade das características físicas em uma bacia hidrográfica. Dentre as metodologias utilizadas na literatura têm-se os modelos hidrológicos distribuídos (Saravanan e Mamjula, 2015; Candelá, Bringandi e Aronica, 2014; Graler et al., 2013; Gibbs et al., 2010), que procuram incorporar a variabilidade espacial dos parâmetros descritivos da geologia, uso do solo e da topografia (Silans et al., 2000), assim como a distribuição espacial da precipitação (Emmanuel et al., 2015; Tetzlaff e Uhlenbrook, 2005; Smith et al., 2004), características relevantes no processo de transformação da precipitação em escoamento.

A representatividade mais realista das características físicas da bacia hidrográfica, tem tornado a abordagem distribuída bastante empregada em estudos científicos. Em vista disso, o seu aperfeiçoamento se faz necessário, valendo-se, contudo, da crescente disponibilização de dados obtidos via Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), dentre eles: o geoprocessamento e o sensoriamento remoto (Saravan e Manjula, 2015; Jena et al., 2012; Grimaldi et al., 2012; Gibbs et al., 2010; Du et al., 2009; Sarangi et al., 2007; Melesse e Graham, 2004; Greene e Cruise, 1995; Mancini e Rosso, 1989; Jeson e Domingue, 1988).

Técnicas de análises espaciais, na modelagem e simulação de cenários de uso do solo, entre outras aplicações complexas, quando introduzidas com o geoprocessamento e o sensoriamento remoto facilitam a tarefa de integração e espacialização dos dados (Hartmann et al., 2010). Destaca-se o avanço na representação topográfica obtida via modelos digitais de elevação (MDE) e o desenvolvimento de procedimentos para processamento automatizado do MDE visando a extração de diferentes tipos de produtos, como caminhos de fluxo, traçado da rede de drenagem, comprimentos e declividades de trechos de rio, dentre outros (Paz e Collischonn, 2007; Paz et al., 2006; Olivera, 2001).

¹ Snyder, F. F. (1938). **Synthetic Unitgraphs**. Transactions of American Geophysics Union, 19th Annual Meeting, Part. 2, p. 447

Existem diversas formas de armazenamento das informações das elevações do terreno, sendo o MDE a forma mais empregada na modelagem hidrológica atualmente. O MDE armazena os dados das elevações a partir de elementos regulares (pixels) em que cada pixel contém o valor correspondente à elevação (Collischonn e Dornelles, 2013), sendo normalmente representado por uma imagem raster (Burrough e McDonnell, 1998 ²*apud* Paz e Collischonn, 2008).

Outro grande benefício da abordagem distribuída é o fato da mesma aceitar a inclusão da variabilidade espacial da precipitação, melhorando a representatividade dos modelos hidrológicos (Emmanuel et al., 2015; Smith et al., 2004), haja vista que a distribuição espacial da precipitação pode ter forte influência na geração de escoamento (Emmanuel et al., 2015; Tetzlaff e Uhlenbrook, 2005). Em particular, o monitoramento de tormentas através de sensores orbitais e por radar tem grande potencial de contribuição para a modelagem hidrológica distribuída (Lobligeois et al., 2014; Tetzlaff e Uhlenbrook, 2005; Melesse e Graham, 2004).

Apesar destes esforços, a ligação entre a variabilidade das características físicas, bem como das precipitações na modelagem hidrológica numa bacia hidrográfica continua a ser uma questão aberta em hidrologia, sendo assim, esta pesquisa visa adaptar a metodologia da curva número (CN) e do método do hidrograma unitário sintético triangular (HUT), ambos propostos pelo *Natural Resource Conservation Service* (NRCS) de forma a simular os processos hidrológicos em nível de pixel, levando em conta as características físicas da bacia hidrográfica.

Como estudo de caso, é tomada a bacia hidrográfica do Arroio Cascata I, uma das sub-bacias hidrográficas do Arroio Dilúvio, localizada em Porto Alegre – RS, escolhida em função da disponibilidade de dados observados de precipitação e de vazão. São simulados 21 eventos observados com diferentes adaptações da metodologia proposta e também fazendo a calibração de parâmetros empíricos.

² Burrough, P.A., McDonnell, R.A. 1998. Principles of Geographical Information Systems: **Spatial Information Systems and Geostatistics**. Oxford University Press. Oxford, 333 p.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Geral

Melhorar a representatividade da heterogeneidade espacial das características físicas na modelagem hidrológica chuva-vazão de pequenas bacias hidrográficas.

1.1.2. Específicos

- ✓ Desenvolver uma abordagem para simulação chuva-vazão com modelo da curva número e do hidrograma unitário sintético triangular, ambos do NRCS, de forma distribuída por pixel;
- ✓ Aferir valores ótimos para os parâmetros do modelo NRCS-CN-HUT, de forma a melhorar a representatividade dos resultados do modelo distribuído, e
- ✓ Avaliar limitações e potencialidades da abordagem proposta em relação ao porte do evento chuvoso.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O texto está organizando em cinco capítulos:

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica dos assuntos inerentes ao trabalho, como modelagem hidrológica, precipitação excedente, hidrograma unitário e geoprocessamento. O capítulo 3 se propõe a detalhar cada metodologia utilizada nesta pesquisa, iniciando pela descrição da área de estudo. Apresenta ainda a adaptação do modelo para distribuído por pixel e a descrição dos ajustes do modelo para avaliação dos resultados.

Os resultados e discussões são apresentados no capítulo 4, cuja análise conduz à apresentação de uma abordagem distribuída para estimativa do escoamento superficial em bacias hidrográficas urbanas. Finalmente, o capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações para futuros trabalhos em continuidade ao presente.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Efeito da urbanização em bacias hidrográficas

O crescimento populacional nas últimas décadas atrelado à falta de políticas públicas voltadas para o planejamento e gestão dos recursos hídricos tem influenciado, direta ou indiretamente, a alteração dos processos naturais do ciclo hidrológico. A morfologia, uso do solo e a cobertura vegetal são alguns dos principais fatores que contribuem para as alterações dos fenômenos físicos envolvidos em uma bacia hidrográfica (Targ et al., 2012; Fritzen e Binda, 2011; Mejia e Moglen, 2010; Santos, 2006; Vendrame e Lopes, 2005).

Autores como Vendrame e Lopes (2005) relatam que em resposta ao crescente aumento da população urbana, os hidrogramas gerados por um evento chuvoso tendem a aumentar e antecipar a vazão de pico, podendo acarretar impactos ambientais, como: processos erosivos, assoreamentos e inundações (Figura 1).

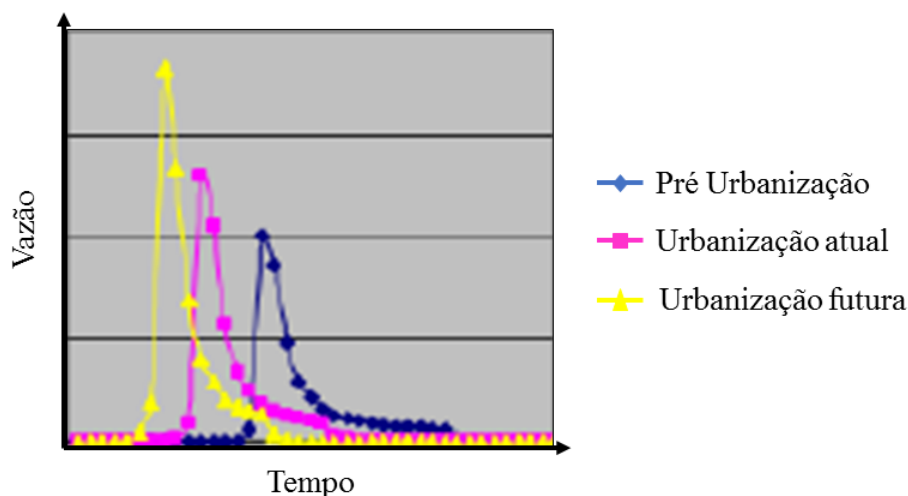


Figura 1 - Análise comparativa de hidrogramas em diferentes cenários de ocupação de uma bacia hidrográfica

Fonte: Adaptado de Vendrame e Lopes (2005)

Campana e Tucci (1999) mencionam que o processo de urbanização mal planejado traz consigo dois aspectos fundamentais quanto à interferência no regime de escoamento das águas pluviais, são eles: a impermeabilização do solo, afetando diretamente no processo de infiltração

(Targ et al., 2012), bem como a canalização dos canais naturais. Tais aspectos deixam como marcas a deterioração dos cursos d'água, devido principalmente à lavagem das superfícies impermeabilizadas, ao transporte de materiais sólidos, ao lançamento de esgotos domiciliares, dentre outros (Lajo, 2003).

Segundo Tucci et al. (1997), os principais impactos das atividades antrópicas sobre o sistema de drenagem urbana podem ser constatados na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais causas e efeitos da urbanização sobre o sistema de drenagem urbana

Causas	Efeitos
Impermeabilização	Maiores picos e vazões
Redes de drenagem	Maiores picos e jusante
Resíduos sólidos	Degradação da qualidade da água; entupimento de bueiros e galerias
Redes de esgotos deficientes	Degradação da qualidade da água; doenças de veiculação hídrica; inundações
Desmatamento e desenvolvimento indisciplinado	Maiores picos e volumes; maior erosão; assoreamento em canais e galerias
Ocupação das várzeas	Maiores prejuízos; maiores picos; maiores custos de utilidades públicas

Fonte: Adaptado de Tucci et al. (1997)

2.2. Métodos de separação dos escoamentos

Dada uma precipitação, parte da mesma percola ao longo das camadas do solo e subsolo, contribuindo para o escoamento subterrâneo. Seu excesso escoar superficialmente no solo, e que dependendo da intensidade e/ou distribuição temporal da precipitação, pode acarretar inundações em áreas urbanas, causando em muitas das vezes transtornos à população. Esse escoamento superficial é gerado pela precipitação excedente, também conhecida como precipitação efetiva.

Em alguns estudos de modelagem hidrológica se faz necessário realizar a separação do escoamento superficial, também conhecido como escoamento direto, do escoamento subterrâneo, mais conhecido por escoamento de base. Isso para melhor entendimento do comportamento da bacia hidrográfica ao dado evento hidrológico, considerando-se a vazão total como a soma do escoamento superficial com o escoamento subterrâneo.

Na literatura existem várias abordagens para tal separação. Entre as abordagens existentes (abordagens mais simples), destaca-se a abordagem que liga os pontos A (início do escoamento superficial) e C (término do escoamento superficial e início do escoamento subterrâneo), conhecida pelo Método do Gráfico (Figura 2). Pela sua simplicidade, tornou-se uma metodologia das mais empregadas por pesquisadores e técnicos, principalmente para eventos com característica de curta duração.

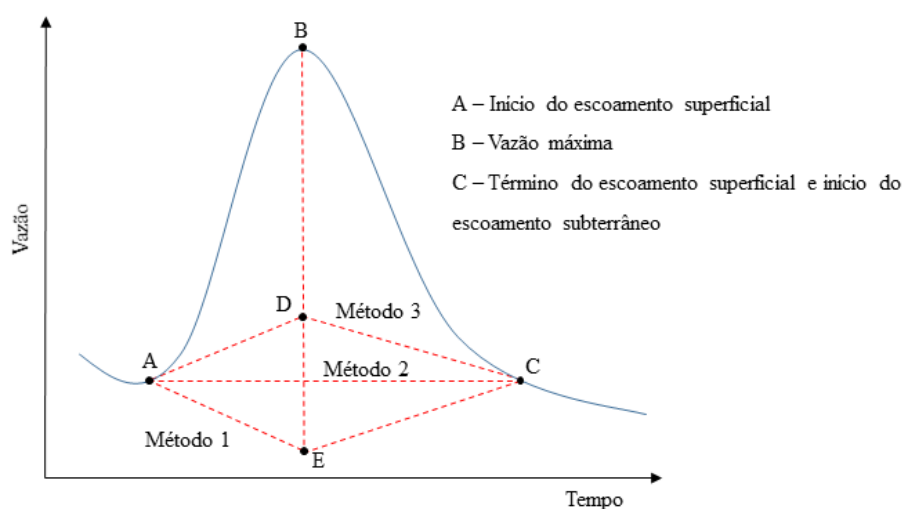


Figura 2 - Representação do método do gráfico

Fonte: Autoria própria

Para o método do gráfico existem três opções. A primeira opção consiste em traçar uma reta na diagonal a partir do ponto A (início do escoamento superficial) até o ponto E, localizado abaixo da vazão de pico (ponto B). Em seguida ligar o ponto E com o início da recessão do escoamento superficial (ponto C). A segunda opção (mais simples), consiste basicamente em aplicar o logaritmo no eixo das vazões, definindo-se o ponto C a partir do qual a variação do logaritmo da vazão apresenta certa linearidade. Na terceira alternativa, o ponto D é definido no

instante em que apresenta a maior vazão (devido à recarga dos aquíferos) com o início da recessão do escoamento subterrâneo.

Outras abordagens um pouco mais complexas, representadas por modelos empíricos, que normalmente incorporam parâmetros relacionados às características da bacia hidrográfica estão sendo empregadas (Chapman e Maxwell, 1996; Arnold et al., 1995; Bougghetton, 1993; Jakeman e Hornberger, 1993). Um exemplo é o modelo de separação dos escoamentos conhecido por filtro de Chapman é representado pela Equação 2 (Eckhardt, 2008 ³ *apud* Collischonn e Dornelles, 2013).

$$a = e^{\frac{-\Delta t}{k}}$$

Equação 1

$$b_i = \frac{a}{2-a} * b_{i-1} + \frac{1-a}{2-a} * y_i$$

Equação 2

Se $b_i > y_i$, então $b_i = y_i$

Equação 3

Sendo k a constante de recessão; Δt o tamanho do intervalo de tempo i e $i+1$ e y_i a vazão observada no tempo i .

Esse tipo de filtro é recomendado para bacias hidrográficas com pouca contribuição de escoamento de base (Collischonn e Dornelles, 2013). Para situações onde há uma maior contribuição do escoamento subterrâneo, Eckhardt (2005) propôs uma reformulação da Equação 2. Essa equação é função de dois parâmetros e é dada pela Equação 4.

³ Eckhardt, K. (2008). A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. **Journal of Hydrology**, v. 352, p. 168-173

$$b_i = \frac{(1 - BFI_{max}) * a * b_{i-1} + (1 - a) * BFI_{max} * y_i}{1 - (a * BFI_{max})}$$

Equação 4

Segundo Collischonn e Dornelles (2013), são sugeridos os seguintes valores do parâmetro BFI_{max} : 0,80 (rios perenes e aquíferos porosos); 0,50 (rios efêmeros ou intermitentes e aquíferos porosos) e 0,25 (rios perenes e aquíferos impermeáveis).

Uma forma alternativa de se estimar os valores de BFI_{max} é através da equação empírica (Equação 5) proposta por Collischonn e Fan (2012), a qual relaciona este parâmetro com as vazões Q_{90} e Q_{50} .

$$BFI_{max} = 0,8344 * \left(\frac{Q_{90}}{Q_{50}} \right) + 0,2146$$

Equação 5

Miranda et al. (2014), analisando métodos de separação com base na comparação entre os volumes de escoamento superficial, obtidos para duas bacias hidrográficas da região do Alto Rio das Velhas, mostraram que os métodos de separação do escoamento superficial de intervalo fixo (IF), intervalo móvel (IM) e o método do mínimo local (ML) produzem resultados semelhantes entre si com relação à estimativa do escoamento superficial (Figura 3).

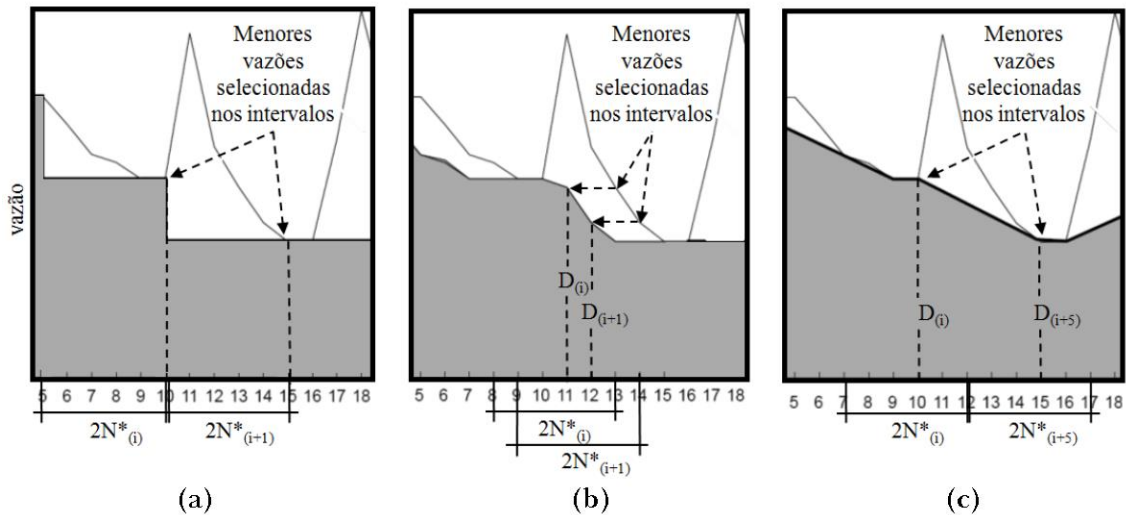


Figura 3 - Separação dos escoamentos pelos métodos do IF (a), IM (b) e ML (c)
Fonte: Miranda et al. (2014) adaptado de Sloto e Crouse (1996)

2.3. Transformação chuva-vazão pelo método NRCS-CN-HU

2.3.1. Método da precipitação excedente

A relação que é uma das mais empregadas atualmente para estimativa do escoamento superficial (precipitação excedente) em bacias hidrográficas sem monitoramento hidrológico é o modelo da CN proposto pelo NRCS (USDA-NRCS, 1972), representado pela Equação 6 e 7.

$$h_{exc} = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad \text{quando } P > 0,2S$$

Equação 6

$$h_{exc} = 0 \quad \text{quando } P \leq 0,2S$$

Equação 7

Sendo h_{exc} a lâmina de precipitação excedente (mm); P a precipitação (mm) e S a máxima infiltração acumulada potencial, isto é, a capacidade do solo em armazenar água (mm).

Para determinar o valor de S , o método do NRCS relaciona esse parâmetro da bacia hidrográfica com outro parâmetro, denominado CN, através da expressão contida na Equação 8 (USDA-TR-55, 1986). E que por sua vez, o valor desse parâmetro CN é dado em tabelas desenvolvidas a partir de experimentos em pequenas bacias hidrográficas rurais nos EUA, e depende basicamente do tipo, condições de uso e umidade do solo no período que antecede o evento.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Equação 8

Sendo CN o parâmetro adimensional, cujo valor varia entre 0 e 100, sendo que 0 corresponde a um solo de capacidade de infiltração infinita e 100 corresponde a um solo completamente impermeável.

Quanto à condição de umidade, o método do NRCS distingue três condições de umidade antecedente do solo, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições de umidade antecedente do solo

Condição	Descrição
I	Solos secos: as chuvas nos últimos 5 dias não ultrapassam 15 mm
II	Situação média: as chuvas nos últimos 5 dias totalizam entre 15 e 53 mm
III	Solo úmido: as chuvas nos últimos 5 dias foram superiores a 53 mm

Fonte: Adaptado de Tucci (2005)

Quanto ao tipo de solo, os solos presentes na bacia hidrográfica são classificados em quatro grupos hidrológicos (A, B, C e D) de acordo com o potencial de escoamento superficial, sendo A o grupo de menor potencial e o D de maior potencial (Sartori e Genovez, 2011).

A Tabela 3 especifica as propriedades de cada um desses grupos hidrológicos dos solos.

Tabela 3 - Grupos hidrológicos dos solos considerados no método NRCS-CN

Tipo de solo	Características
A	Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos com pouco silte e argila
B	Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundos do que do tipo A e com permeabilidade superior à média
C	Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo
D	Solos contendo argilas expansivas e pouco profundas com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial

Fonte: Tucci (2005)

Após a definição das condições de umidade e do grupo hidrológico de cada tipo de solo, a determinação do CN é feita por meio de tabelas que fornecem valores de CN para os diferentes grupos hidrológicos dos solos e respectivas condições de uso do solo, conforme ilustradas nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Valores do parâmetro CN para áreas agrícolas no método NRCS-CN

Uso do solo	Superfície	A	B	C	D
Solo lavrado	com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	em curvas de níveis	67	77	83	87
	terraceamento em nível	64	76	84	88
	em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	em curvas de níveis	62	74	82	85
	terraceamento em nível	60	71	79	82
	em fileiras	62	75	83	87
Pastagens em curvas de nível	pobres	47	67	81	88
	normais	25	59	75	83
	boas	6	35	70	79
Campos permanentes	normais	30	58	71	78
	espasas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	normais	36	60	73	79
	densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras	normais	56	75	86	91
Estradas de terra	ruim	72	82	87	89
	de superfície dura	74	84	90	92
Floresta	muito esparsa, baixa transpiração	56	75	86	91
	espasas	46	68	78	84
	densas, de alta transpiração	26	52	62	69
	normais	36	60	70	76

Fonte: Tucci (2005)

Tabela 5 - Valores do parâmetro CN para áreas urbanas no método NRCS-CN

Utilização ou cobertura do solo		A	B	C	D
Espaços abertos	Matos ou gramas cobrem 75% ou mais da área	39	61	74	84
	Matos ou gramas cobrem 50 a 75% da área	49	69	79	77
Áreas comerciais (85% impermeáveis)		89	92	94	95
Distritos industriais (72% impermeáveis)		81	88	91	93
Zonas residências					
Lotes de (m ²)	% média impermeável				
<500	65	77	85	90	92
1000	38	61	75	83	87
1300	30	57	72	81	86
2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84

Fonte: Tucci (2005)

Continuação da Tabela 5 - Valores do parâmetro CN para áreas urbanas no método NRCS-CN

Utilização ou cobertura do solo		A	B	C	D
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc		98	98	98	98
Arruamentos e estradas	Asfaltadas e com drenagem urbana	98	98	98	98
	Paralelepípedos	76	85	89	91
	Terra	72	82	87	89

Fonte: Tucci (2005)

As Tabela 4 e 5 são referentes às condições médias de umidade antecedente. Para outras condições são realizadas correções aos valores tabelados para situações diferentes da média (Tabela 6). Outras metodologias de obtenção dos valores de CN para as condições de umidade antecedente I e III têm sido propostas na literatura (Ajmal e Kim, 2015; Rutkowska et al., 2015; D'Asaro et al., 2014; Mishra et al., 2008). A Tabela 7 relata algumas dessas formulações.

Tabela 6 - Correção dos valores de CN de acordo com a umidade antecedente do solo

Condição II	Condição I	Condição III
100	100	100
95	87	98
90	78	96
85	70	94
80	63	91
75	57	88
70	51	85
65	45	82
60	40	78
55	35	74
50	31	70
45	26	65
40	22	60
35	18	55
30	15	50
25	12	43
20	9	37
15	6	30
10	4	2
5	2	13

Fonte: Tucci (2005)

Tabela 7 - Equações empíricas de convenção do parâmetro CN

Autor	Condição I	Condição III
Sobhani (1975)	$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,334 - 0,01334 * CN_{II}}$	$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,4036 + 0,005964 * CN_{II}}$
Hawkins et al. (1985)	$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,281 - 0,01281 * CN_{II}}$	$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,427 + 0,00573 * CN_{II}}$
Neitsch et al. (1988)	$CN_I = \frac{4,2 * CN_{II}}{10 - 0,058 * CN_{II}}$	$CN_{III} = \frac{23 * CN_{II}}{10 + 0,13 * CN_{II}}$
Neitsch et al. (2002)	$CN_I = CN_{II} - \frac{20 * (100 - CN_{II})}{\{100 - CN_{II} + e^{[2,533 - 0,0636 * (100 - CN_{II})]}\}}$	$CN_{III} = CN_{II} * e^{\{0,00673 * (100 - CN_{II})\}}$
Mishra et al. (2008)	$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,2754 - 0,012754 * CN_{II}}$	$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,430 + 0,0057 * CN_{II}}$

Fonte: Mishra et al. (2008)

A relativa facilidade de aplicação do método CN torna comum a sua aplicação em bacias hidrográficas com características diferentes daquelas onde foram executados os estudos que deram origem ao modelo (Cunha et al., 2015), entretanto, há de saber que o parâmetro CN não é o único parâmetro empírico da formulação inicial.

O índice de abstrações iniciais, fixado em 20% pelo NRCS em sua abordagem tradicional, também tem sido alvo de críticas (Durán-Barroso, González e Valdés, 2016; Asaro et al., 2014; Jena et al., 2012; Paudel et al., 2009). Ajmal e Kim (2014) relatam que o valor proposto é considerado relativamente alto e distante da realidade até mesmo para bacias hidrográficas onde o modelo foi preconizado.

2.3.2. Teoria do hidrograma unitário

A teoria do hidrograma unitário (HU) foi proposto por Sherman (1932) ⁴*apud* Silveira (2016), como uma função-resposta linear da bacia hidrográfica a uma precipitação efetiva unitária, ou seja, o hidrograma unitário pode ser entendido como sendo o hidrograma resultante de um escoamento superficial direto, decorrente de uma precipitação efetiva com intensidade e duração unitárias (Dawod e Koshak, 2011), que cai uniformemente sobre toda a área de drenagem a uma taxa constante durante um determinado período (Chow et al., 1988 ⁵ *apud* Agirre et al., 2005).

Essa teoria foi um grande marco para hidrologia, isso porque incorporou-se um método simples e prático para determinação de hidrogramas a partir de dados hidrológicos observados.

O HU pode ser determinado pelos métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos são normalmente utilizados na determinação de hidrogramas unitários em regiões onde se têm dados hidrológicos disponíveis. Sendo normalmente, segundo Collischonn e Dornelles (2013), determinados por equações de convoluções.

Na ausência de dados observados, o que é comum, especialmente no Brasil, cuja área inviabiliza o completo monitoramento hidrológico (Carvalho e Chaudrhy, 2001), recomenda-

⁴ Sherman, L. K. (1932). Streamflow from rainfall by the unit-graph method. **Eng. News Rec.**, v. 108, n. 14, p. 501-506

⁵ Chow, V. T.; Maidment, D. R.; Mays, L. W. (1988). **Applied Hydrology**. McGraw-Hill, New York, USA

se aplicar os métodos ditos indiretos, como por exemplo, a teoria do hidrograma unitário sintético do NRCS.

O método do HU tem esse nome porque conceitualmente o HU é o hidrograma do escoamento direto, causado por uma precipitação efetiva unitária (precipitação efetiva de 1 mm ou 1 cm, por exemplo) (Collischonn e Dornelles, 2013; Pinto et al., 1976). O método do HU está baseado em três considerações (Collischonn e Dornelles, 2013), são elas:

- (i) Precipitação efetiva e unitária tem intensidade constante ao longo de sua duração. Isso significa que se supõe uma distribuição temporal uniforme da precipitação;
- (ii) Precipitação efetiva e unitária distribui-se de forma uniforme sobre toda a área de drenagem, e
- (iii) A bacia hidrográfica tem comportamento linear, podendo ser aplicados princípios de proporcionalidade e superposição.

Segundo o princípio da proporcionalidade, para uma precipitação efetiva P de duração igual à da precipitação efetiva unitária do HU, a resposta da bacia hidrográfica a tal precipitação P tem a mesma duração do HU, sendo as vazões proporcionais ao HU (Figura 4).

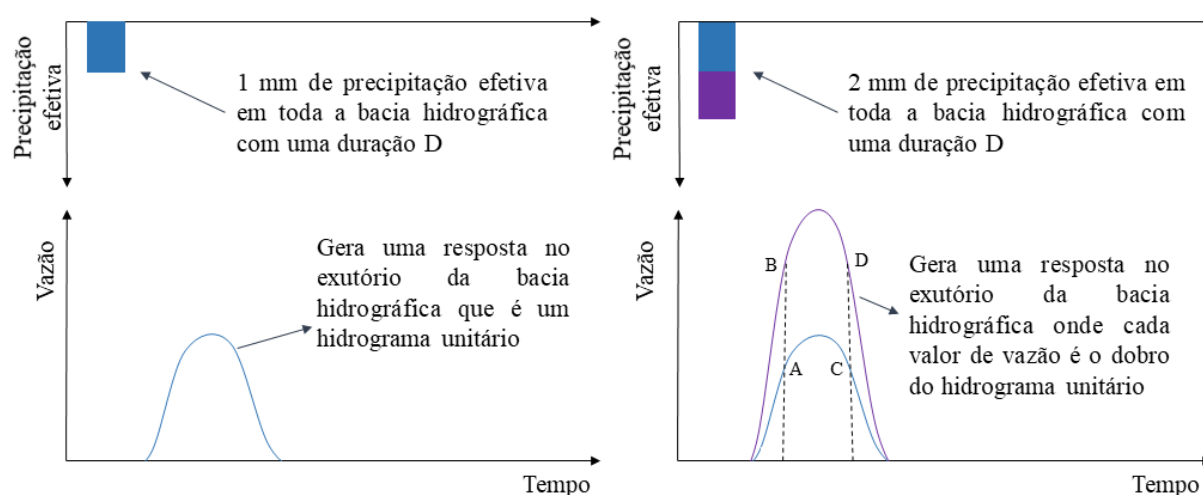


Figura 4 - Princípio da proporcionalidade na teoria do hidrograma unitário

Fonte: Autoria própria

Na Figura 4 o gráfico do lado esquerdo representa o hidrograma unitário, isto é, a resposta de uma bacia hipotética a uma precipitação efetiva de 1 mm. O gráfico do lado direito, por sua vez, representa a resposta dessa bacia hidrográfica a precipitação efetiva de 2 mm, porém com a mesma duração da precipitação de 1 mm, dessa forma, de acordo com o princípio da proporcionalidade, essa resposta é obtida somando dois hidrogramas unitários. Nesse sentido, a vazão do ponto A é duas vezes menor do que a vazão no ponto B e a vazão no ponto D é duas vezes maior do que a vazão no ponto C, e assim para todos os valores de vazão dos hidrogramas é respeitada a mesma proporção.

Já o princípio da superposição considera que dada a ocorrência de precipitações consecutivas no tempo, cada uma delas produz uma resposta na bacia independente da outra (proporcional ao HU, pelo primeiro princípio) (Figura 5). Isso significa que as ordenadas do hidrograma resultante são iguais à soma das ordenadas dos hidrogramas gerados por cada um dos blocos de precipitação efetiva, respeitando os instantes de tempo correspondentes.

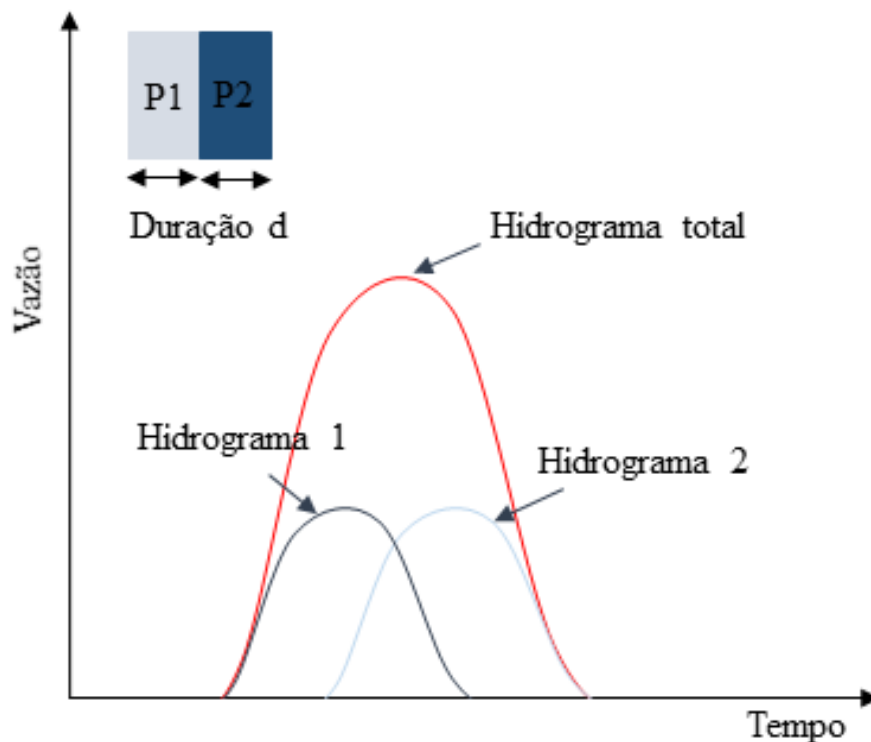


Figura 5 - Princípio da superposição na teoria do hidrograma unitário
Fonte: Autoria própria

2.3.3. Teoria do hidrograma unitário sintético

Com o surgimento do conceito do HU, surgiu no estudo de Snyder (1938) ¹ *apud* Silveira (2016) a primeira proposta de obtenção de HUs em bacias hidrográficas situadas em regiões onde não há disponibilidade de dados hidrológicos (hidrograma unitário sintético – HUS). Fato comum em pequenas bacias hidrográficas, principalmente no Brasil, em virtude de sua extensa área territorial.

Partindo do modelo proposto por Snyder, diversas abordagens para o aperfeiçoamento do HUS foram propostas, tais como: método do hidrograma unitário sintético triangular do NRCS e do Colorado, estudos de Commons, Getty e McHughes, Espey, Clark, Bernard, McCarthy, Taylor e Schwarz, Mitchell, Dooge, Warnock (Pinto et al., 1976).

A partir de análises não publicadas de hidrogramas unitários e com um grande número de bacias hidrográficas com diferentes características em função do tempo de pico e de base, os técnicos do NRCS propuseram que o HU pode ser aproximado por um triângulo. Este hidrograma unitário (HU) é conhecido como hidrograma unitário sintético triangular (Figura 6), utilizado para determinar hidrogramas unitários em regiões onde não há informações hidrológicas.

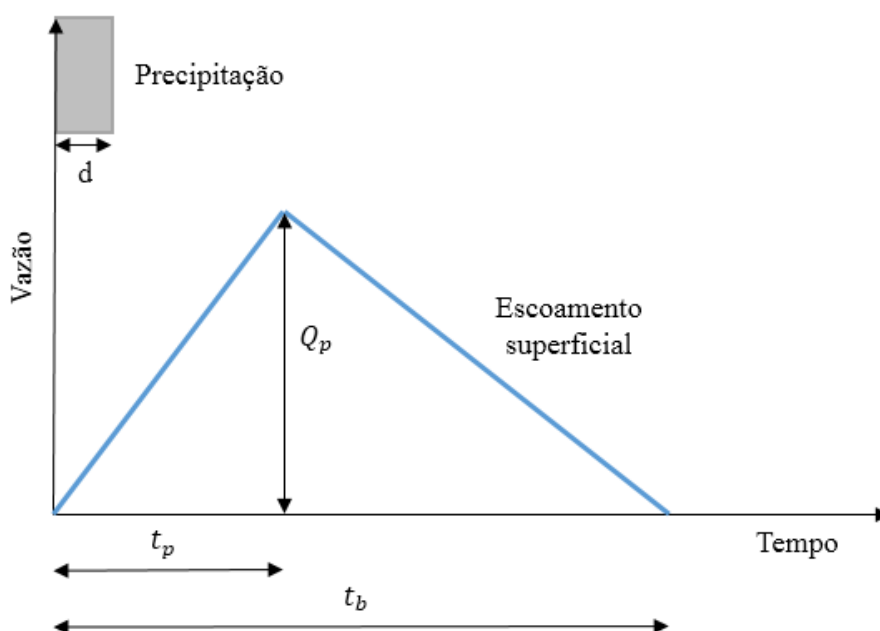


Figura 6 - Hidrograma unitário sintético triangular do NRCS
Fonte: Autoria própria

Chow et al. (1988) ⁵ *apud* Collischonn e Dornelles (2013) descrevem as expressões matemáticas que permitem a determinação dos parâmetros da Figura 5, utilizados na construção do hidrograma unitário sintético para uma precipitação excedente de 1 mm. O tempo de pico, que é o tempo de subida do hidrograma até atingir a vazão de pico, pode ser encontrado a partir da aplicação da Equação 9.

$$t_p = \frac{d}{2} + 0,6 * t_c$$

Equação 9

Sendo t_p o tempo de pico (h); d a duração da precipitação (h) e t_c o tempo de concentração da bacia hidrográfica (h).

O tempo de base do hidrograma, que representa a duração do escoamento superficial, é dado pela Equação 10.

$$t_b = 2,67 * t_p$$

Equação 10

Sendo t_b o tempo de base (h).

A vazão de pico do hidrograma unitário triangular, para uma chuva efetiva de 1 mm, pode ser calculada pela Equação 11.

$$Q_p = \frac{0,208 * A}{t_p}$$

Equação 11

Sendo Q_p a vazão de pico em $\text{m}^3.\text{s}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ e A a área da bacia hidrográfica em km^2 .

Em resumo, pode-se dizer que as informações de entrada para a construção do HUT do NRCS são tempo de concentração e área da bacia hidrográfica.

Após a determinação da precipitação excedente e dos parâmetros do hidrograma unitário sintético, torna-se possível, através dos princípios da proporcionalidade e da superposição, calcular os hidrogramas resultantes de eventos complexos.

Esse cálculo é feito através da convolução, sendo resumido por duas principais etapas:

- (i) Cálculo das ordenadas do hidrograma referentes a cada precipitação excedente em intervalos de tempo discretizados (proporcionalidade), e
- (ii) A soma das ordenadas dos diversos hidrogramas nos intervalos de tempo correspondentes (superposição).

Porém, antes de aplicar a convolução propriamente dita, é preciso definir a duração do intervalo de discretização do hidrograma unitário, que deve ter a mesma duração d da precipitação excedente unitária e que consequentemente é a mesma duração dos intervalos de tempo sobre os quais a precipitação foi dividida.

Na sequência, a cada intervalo de duração d (para $t = d, 2d, 3d, \dots$), deve-se calcular a vazão $q(t)$ correspondente no hidrograma unitário. Essa vazão é obtida a partir das Equações 12 e 13.

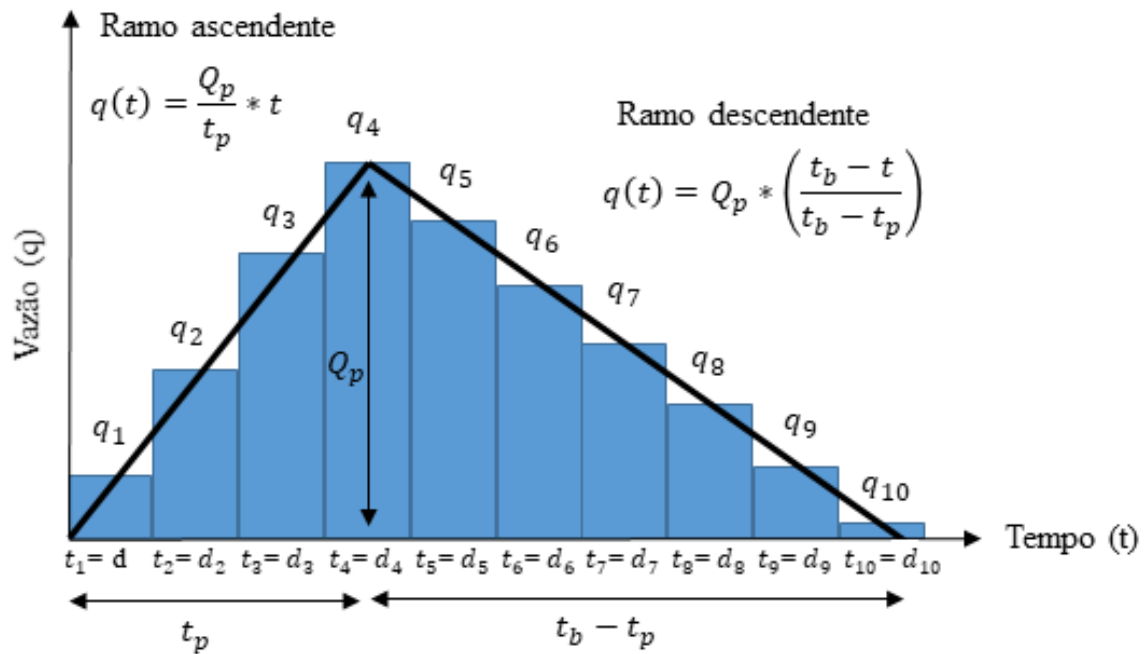
$$q(t) = \frac{Q_p}{t_p} * t \quad \text{para } t \leq t_p$$

Equação 12

$$q(t) = Q_p * \left(\frac{t_b - t}{t_b - t_p} \right) \quad \text{para } t \geq t_p$$

Equação 13

Sendo $q(t)$ a vazão no tempo t ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) e t o instante de tempo para o qual se deseja estimar a vazão do HU (min).



Então, considera-se que a discretização de um HU tenha como resultado as relações entre tempo (t) e vazão (q(t)). Considere agora que uma precipitação excedente (de projeto ou observada) tenha resultado nas seguintes relações entre tempo (t) e precipitação excedente (P(t)): para t_1 a precipitação foi de P_1 ; para t_2 a precipitação foi de P_2 ; para t_3 a precipitação foi de P_3 .

Dessa forma, para a obtenção do hidrograma gerado pela precipitação P_1 , multiplica-se P_1 por cada uma das vazões do hidrograma unitário discretizado que foram apresentadas na Figura 7. Da mesma forma, precede-se para a obtenção dos hidrogramas gerados pelas precipitações excedentes P_2 e P_3 .

Esses hidrogramas gerados estão deslocados no tempo conforme o instante em que ocorreu o bloco de precipitação excedente, conforme Tabela 8, que relaciona o tempo (t) e as vazões geradas por cada uma das precipitações excedentes ($Q(P_i)$). Como foi visto, pelo princípio da superposição, pode-se gerar um hidrograma resultante das precipitações efetivas P_1 , P_2 e P_3 , sendo o mesmo obtido através da soma das ordenadas dos hidrogramas gerados por cada uma das precipitações efetivas, para cada instante de tempo.

Tabela 8 - Processo de convolução na teoria do hidrograma unitário

Tempo	Ordenadas (HU)	P	Convolução			
			Q(P ₁)	Q(P ₂)	Q(P ₃)	Q(total)
t ₁	q ₁	P ₁	q ₁ *P ₁			q ₁ *P ₁
t ₂	q ₂	P ₂	q ₂ *P ₁	q ₁ *P ₂		q ₂ *P ₁ + q ₁ *P ₂
t ₃	q ₃	P ₃	q ₃ *P ₁	q ₂ *P ₂	q ₁ *P ₃	q ₃ *P ₁ + q ₂ *P ₂ + q ₁ *P ₃
t ₄	q ₄		q ₄ *P ₁	q ₃ *P ₂	q ₂ *P ₃	q ₄ *P ₁ + q ₃ *P ₂ + q ₂ *P ₃
t ₅	q ₅		q ₅ *P ₁	q ₄ *P ₂	q ₃ *P ₃	q ₅ *P ₁ + q ₄ *P ₂ + q ₃ *P ₃
t ₆	q ₆		q ₆ *P ₁	q ₅ *P ₂	q ₄ *P ₃	q ₆ *P ₁ + q ₅ *P ₂ + q ₄ *P ₃
t ₇				q ₆ *P ₂	q ₅ *P ₃	q ₆ *P ₂ + q ₅ *P ₃
t ₈					q ₆ *P ₃	q ₆ *P ₃

Fonte: Autoria própria

Tucci (2003), implementando o estudo de Diaz e Tucci (1987), realizou adaptações dos parâmetros do modelo do NRCS-HUT para bacias hidrográficas urbanas. As equações foram adaptadas conforme a área impermeável (AI) e a densidade habitacional (DH). As vazões são dadas pelas as seguintes equações:

$$Q_p = 0,035684 * A^{0,607} * DH^{0,691}$$

Equação 14

$$q_p = \frac{35,684 * DH^{0,691}}{A^{0,607}}$$

Equação 15

Sendo Q_p em m³/s; q_p em 1/(s.km²) e DH em % e A em km².

O tempo de pico e o tempo de concentração podem ser calculadas a partir das seguintes expressões:

$$t_p = \frac{253,25 * A^{0,438}}{AI^{0,77}}$$

Equação 16

$$t_p = \frac{439,31 * A^{0,438}}{DH^{0,77}}$$

Equação 17

$$t_c = \frac{712,21 * A^{0,397}}{AI^{0,691}}$$

Equação 18

$$t_c = \frac{1172,6 * A^{0,397}}{DH^{0,691}}$$

Equação 19

Sendo a equação 17 válida para $DH < 120$ hab/hectare e $A > 2$ km²; os valores de t_p e t_c são dados em minutos e AI em %. Segundo o autor, para que o hidrograma seja adequadamente representado deve-se considerar $\Delta t < (1/5) t_c$.

2.3.4. Exemplos de aplicações

Majidi et al. (2012), comparando os métodos do NRCS-HUT com o método racional, mencionam que o modelo do NRCS apresenta estimativa mais precisa. Autores como Silveira, 2016; Banach, 2011; Tucci, 2003 vêm estudando o HUT, de forma que o seu uso seja generalizado. No entanto, para Tucci (2003) a regionalização de parâmetros apenas busca tornar mínimo o erro da falta de dados hidrológicas durante o ajuste do modelo.

Silva e Tucci (1998), utilizando um modelo hidrológico que permite estimar a relação entre as vazões média diária com as vazões de pico para regiões onde se tem conhecimento da precipitação, tipo e uso do solo, mostram que o modelo proposto pode ser utilizado para reduzir as incertezas na determinação da vazão de projeto.

Barbosa e Fill (2001), por meio do HU, definiram um modelo de previsões de vazões, mostrando que o HU, apesar das simplificações e restrições na sua utilização, fornece bons resultados particularmente no caso de tormentas de magnitude pequena e média.

Silveira (2005), avaliando o desempenho de 23 fórmulas de tempo de concentração para bacias hidrográficas urbanas e rurais, revelou que é possível o uso de fórmulas de tempo de concentração para uma faixa de áreas de bacias hidrográficas muito superiores às usadas em

sua calibração, sobretudo em bacias hidrográficas rurais. Sendo o tempo de concentração para Almeida et al. (2013), um parâmetro relevante para a análise hidrológica em bacias hidrográficas.

Segundo Silva e Araujo (2013), a estimativa da velocidade de escoamento superficial, bem como do tempo de concentração, é relevante no estudo do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, podendo ser utilizados em estudos de modelagem hidrológica, auxiliando na compreensão do impacto que a impermeabilização do solo pode causar no escoamento superficial.

Pereira et al. (2016) aplicando o princípio do HU, desenvolveram uma metodologia que leva em conta as características físicas e geomorfológicas da bacia hidrográfica. Foram calibrados 49 hidrogramas, referentes a 7 bacias hidrográficas com 7 eventos cada uma. Das bacias hidrográficas estudadas, o pior resultado apresentou antecipação dos tempos de pico simulados em relação aos observados, variando de 1 a 3 dias, com apenas 1 hidrograma apresentando o mesmo tempo de pico constados nos dados brutos. Por outro lado, os melhores resultados apresentaram 5 hidrogramas com o mesmo tempo de pico dos dados observados, e 2 precederam o observado em um dia.

Maziero (2010), utilizando o geoprocessamento na determinação do Histograma Tempo-Área (HTA) em diferentes cenários de velocidades e de uso do solo, constatou que os parâmetros de velocidades de escoamentos e do tempo de concentração da bacia hidrográfica são parâmetros inversamente proporcionais. Segundo o autor, se o tempo de contribuição da bacia hidrográfica for pequeno, contribui para o aumento da vazão de pico. Para a calibração do modelo o autor realizou diversas simulações, estipulando-se que valores de $R^2 > 0,6$ são o indicativo de que os parâmetros do modelo apresentam um bom ajuste. Para Tucci (2005), um bom ajuste depende da disponibilidade e qualidade das informações (dados de entrada), e principalmente das características fisiográficas da bacia hidrográfica.

Neto et al. (2012) desenvolveram um estudo em 3 microbacias hidrográficas rurais do semiárido brasileiro. Eles avaliaram através da calibração e validação o desempenho do modelo da NRCS-CN para diferentes manejos de uso do solo. Durante a validação os autores aplicaram os índices estatísticos de coeficiente de correlação, índice de Willmott e os coeficientes de Nash e Sutcliffe para avaliar o desempenho da metodologia aplicada. Como resultados obtiveram

valores de CNs bem próximos daqueles normalmente empregados na literatura, apresentando em seus resultados valores de Nash superiores a 0,6, e o índice de confiança acima de 0,75.

Em um outro trabalho (Paulino, 2014) foi avaliado a sensibilidade do modelo NRCS à variação de CN. Os resultados apontam que o modelo do NRCS se mostrou sensível a essa variação, pois pequenas variações nesse parâmetro foi suficiente para gerar variações nas vazões de pico, no exutório da bacia hidrográfica (Tabela 9). O autor cometa que a medida que o período de retorno diminui a variação tende a aumentar de forma significativa e que o uso de imagens de baixa resolução tende a subestimar o valor da vazão de pico (Figura 8).

Tabela 9 - Comparação das simulações realizadas utilizando CNs obtidos a partir de imagens de alta e de baixa resolução considerando um Tr de 5 anos

Bacia	CN – Imagem de baixa resolução	CN – Imagem de alta resolução	Diferença de CN (%)	Q _p – Imagem de baixa resolução	Q _p – Imagem de alta resolução	Diferença da Q _p (%)
SB1	76,64	81,81	6,33	3,20	5,30	39,62
SB2	76,35	85,47	10,66	2,40	5,80	58,69
SB3	72,49	77,68	6,68	1,40	2,50	44,00
SB4	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

Fonte: Paulino (2014)

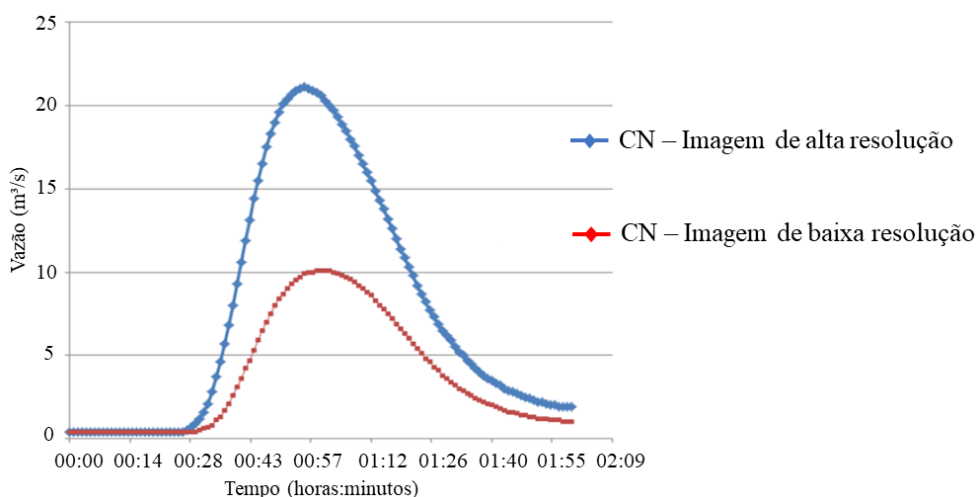


Figura 8 - Efeito da resolução da imagem no hidrograma resultante

Fonte: Paulino (2014)

Todavia, quando o HU é empregado para estimar eventos de inundação frequente (T_r de 2 anos), é aconselhado empregar eventos de pequeno e médio porte. Por outro lado, para eventos raros (T_r de 50 anos) é recomendado empregar um ou dois dos maiores eventos registrados, para evitar abatimentos no HU. Isso porque, o escoamento superficial varia conforme a grandeza do evento, ou seja, eventos de pequenas magnitudes possuem velocidades menores e tenderá a subestimar o HU de um evento maior, que possui maior velocidade de escoamento e menor tempo de concentração (Tucci, 2003).

Ainda do trabalho de Paulino (2014), o mesmo realizou uma análise de sensibilidade do modelo NRCS à distribuição temporal da precipitação, fixando os valores de CN e do tempo de concentração, sendo este último parâmetro (T_c) obtido a partir da formulação de Carter. A distribuição da precipitação foi variada conforme os métodos: Blocos alternados, Huff 1º Quartil, Huff 2º Quartil e Bureau of Reclamation. De acordo com a metodologia empregada, observa-se da Figura 9 que pouca é a variação da vazão de pico entre as metodologias. Diferentemente foi o tempo de pico, que se mostrou mais sensível a metodologia empregada.

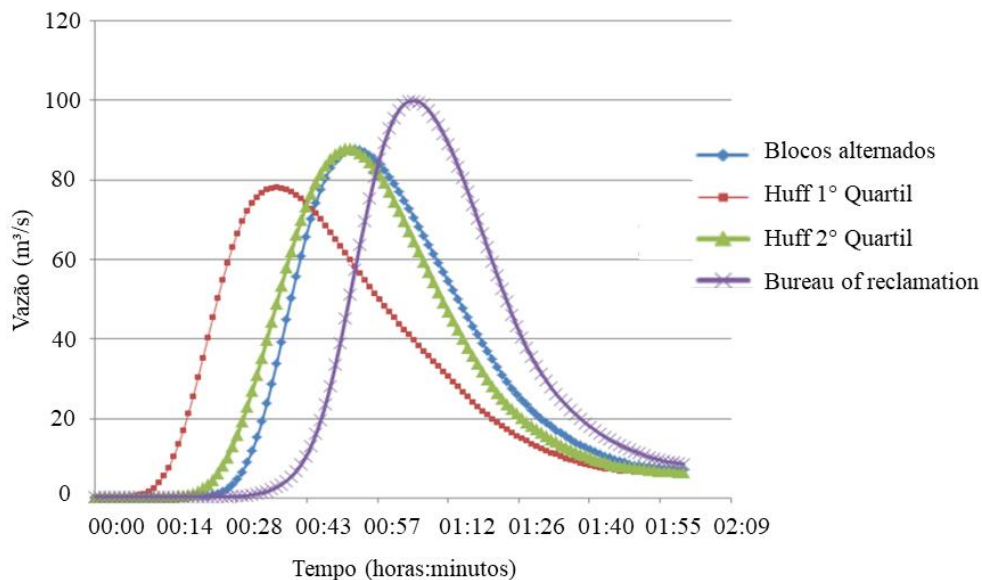


Figura 9 - Efeito do hidrograma resultante conforme a metodologia de distribuição temporal da precipitação

Fonte: Paulino (2014)

2.4. Abordagem distribuída para modelagem chuva-vazão

Processos hidrológicos como a precipitação, infiltração e escoamento são pela sua natureza variáveis no espaço e no tempo. Modelos de simulação hidrológica tradicionais apresentam limitações quanto a essas variações. Quando as variações temporais de precipitação são conhecidas, elas podem ser empregadas em modelos de simulações. As variações espaciais nas propriedades das bacias hidrográficas que afetam a infiltração e escoamento superficial podem ser muito mais complexas de incorporar ao modelo hidrológico (Paudel, Nelson e Scharttenberg, 2009).

Atualmente existem várias formas de representação de modelos hidrológicos disponíveis. Dentre tais formas abordadas na literatura, têm-se: os concentrados, distribuídos, ou ainda, distribuídos por subbacias (Figura 10).

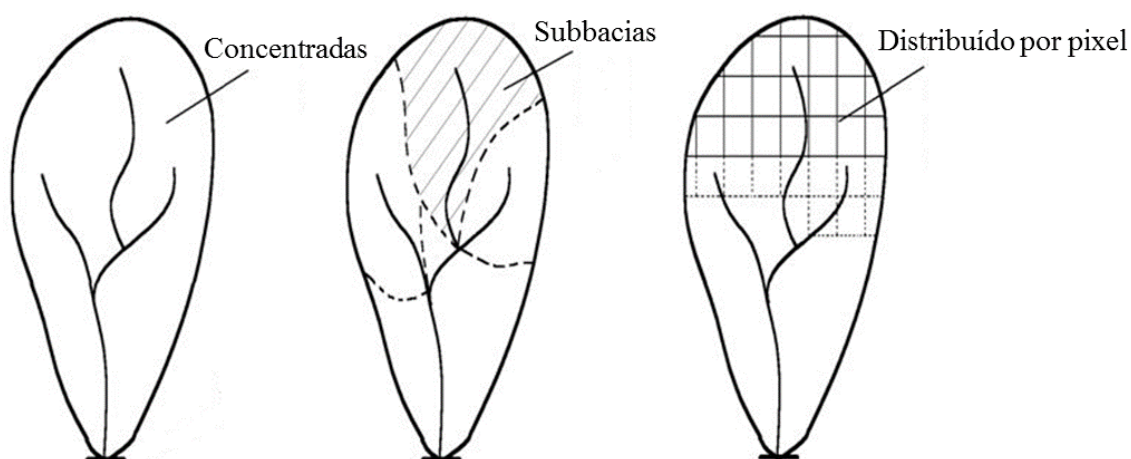


Figura 10 - Principais formas de discretização de modelos hidrológicos
Fonte: Tucci (2005)

A inclusão da relação geomorfologia-hidrologia nos modelos hidrológicos distribuídos, de forma geral, vem tornando-os bastante estudados pelos pesquisadores da área de recursos hídricos (Christianson et al., 2016; Saravan e Manjula, 2015; Paudel, Nelson e Scharttenberg, 2009; Jena et al., 2012; Noto e Loggia, 2007; Melesse e Graham, 2004).

A relação geomorfologia-hidrologia pode ser empregada para estimar o escoamento superficial, sendo os métodos do HUG já mencionados anteriormente e o Hidrograma Unitário

Espacialmente Distribuído (HUSD) duas das abordagens mais utilizadas atualmente. Geralmente, as abordagens envolvem uma estimativa da velocidade para parametrizar o HU. No entanto, as informações sobre a velocidade são geralmente limitadas para bacias hidrográficas onde estes métodos mais se adequam. Sendo, portanto, necessário o emprego de mais estudos para investigar se as relações propostas são adequadas para outras bacias hidrográficas (Gibbs, Dandy e Maier, 2010).

O método HUG foi abordado pela primeira vez por Rodriguez e Valdes (1979). O HUG pode ser determinado a partir da entrada dos parâmetros morfométricos das bacias hidrográficas, tais como: a área, forma, topografia, declividade, entre outros (Gibbs, Dandy e Maier, 2010). Cabe ressaltar que tais parâmetros influenciam diretamente a forma do hidrograma (Snyder, 1938 ¹ *apud* Narayan, Dikshit e Dwivedi, 2012), diferentemente do método abordado anteriormente (NRCS-HUT), que não considera as características geomorfológicas da bacia hidrográfica.

O HUG pode ser tratado como uma ferramenta útil para o cálculo dos hidrogramas de cheia (Zhang, 2014). Além disso, o método é uma abordagem viável, quando comparada com o modelo do NRCS-HUT (abordagem tradicional). Isso porque não requer métodos convencionais de regionalização de hidrograma unitários, como o modelo de Clark e de Nash, visto que evita a necessidade de dados de vazão (Narayan, Dikshit e Dwivedi, 2012). É, portanto, bastante útil, especialmente no Brasil, cuja extensão territorial inviabiliza os programas convencionais de observação hidrológica (Carvalho e Chaudrhy, 2001).

Andrade (2007) utilizando a formulação do HU, desenvolveu um modelo de obtenção do escoamento superficial. O autor realizou diversas simulações com e sem amortecimento do escoamento superficial, avaliando o efeito quanto aos parâmetros de tempo e vazão de pico dos dados observados com os simulados e da velocidade, sendo avaliados em diferentes ordens de rios. Em seus resultados ficaram evidenciados que, velocidades menores tendem a antecipar o tempo de pico e diminuir a vazão de pico.

Carvalho e Chaudrhy (2001), estudando o modelo de HU Geomorfológico (HUG) proposto por Gupta et al. (1980), observaram que se atribuindo um valor de velocidade média correspondente a vazão máxima, torna-se mais apropriado para comparação do valor de pico dos hidrogramas. Um dos fatores que está diretamente relacionado a subestimação do tempo de

pico segundo os autores, é a intensidade máxima precipitada que se concentra logo no início do evento chuvoso. Ainda segundo os autores, o pico e o tempo de recorrência são parâmetros afetados de maneira inversa pela duração da precipitação e sua intensidade.

Segundo Noto e Loggia (2007), as informações da topografia, cobertura vegetal e do uso do solo são mais relevantes do que as informações hidrológicas (precipitação e vazão). Os autores estudaram o modelo do HU de forma distribuída por pixel, a partir de ferramentas computacionais, como sensoriamento remoto e de SIG. O tempo de concentração foi estimado a partir das direções de fluxo, e da combinando das equações de MANNING e da continuidade. O procedimento proposto foi aplicado em duas bacias hidrográficas, a fim de estabelecer o nível de concordância entre os hidrogramas simulados e observados. Para calibração do modelo, foram calculados os percentuais de erros do tempo de pico (observados x simulados), que segundo os autores é uma característica da concentração de vazão, e das vazões de pico.

De acordo com Moglen (2000), técnicas de modelagem distribuídas aplicadas ao modelo do NRCS-CN permitem identificar áreas de alta e baixa produção de escoamento superficial em pontos específicos da bacia hidrográfica. Isso porque a técnica lida com cada pixel separadamente, resultando em maiores estimativas de escoamento superficial do que a abordagem tradicional. Em seu modelo o autor propôs que o escoamento superficial seja agregado às direções de fluxo (Figura 11). Para Emmanuel et al. (2015), nenhum consenso foi alcançado ainda sobre a influência da variabilidade espacial da precipitação na modelagem de escoamento superficial.

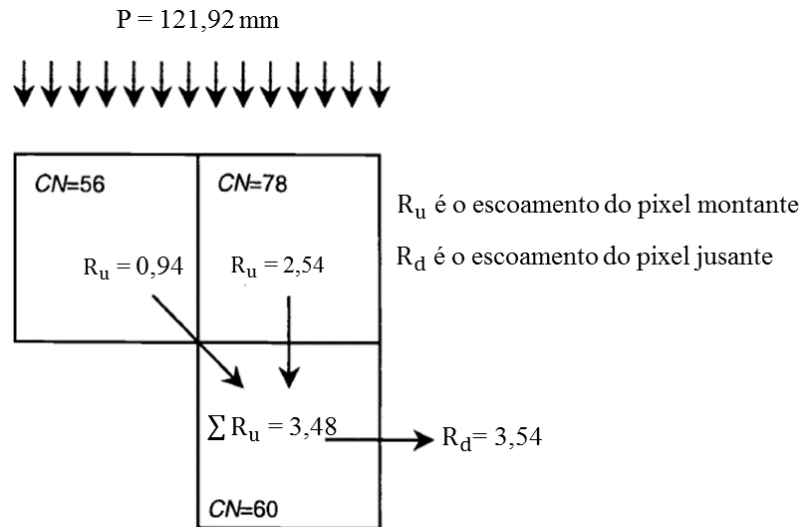


Figura 11 - Esquema representativo de agregação do escoamento
Fonte: Moglen (2000)

Diferentemente, Mejia e Moglen (2010) estudando cenários de casos extremos de impermeabilidade (Figura 12) apontam em um dos seus resultados que o amortecimento do escoamento por meio da agregação dos canais, mananciais e da distribuição uniforme da precipitação tendem a diminuir as vazões de pico em cenários de urbanização. Os cenários apresentados na Figura 12-a e 12-d apresentam característica de subestimação do tempo de pico de aproximadamente 4 horas. No entanto, em todos os cenários, a mudança na vazão de pico e tempo para o pico ficaram fora dos limites estimados pelos algoritmos SCEM e GLUE. Os algoritmos foram utilizados para distinguir as mudanças no hidrograma conforme a variabilidade nos parâmetros e condições iniciais.

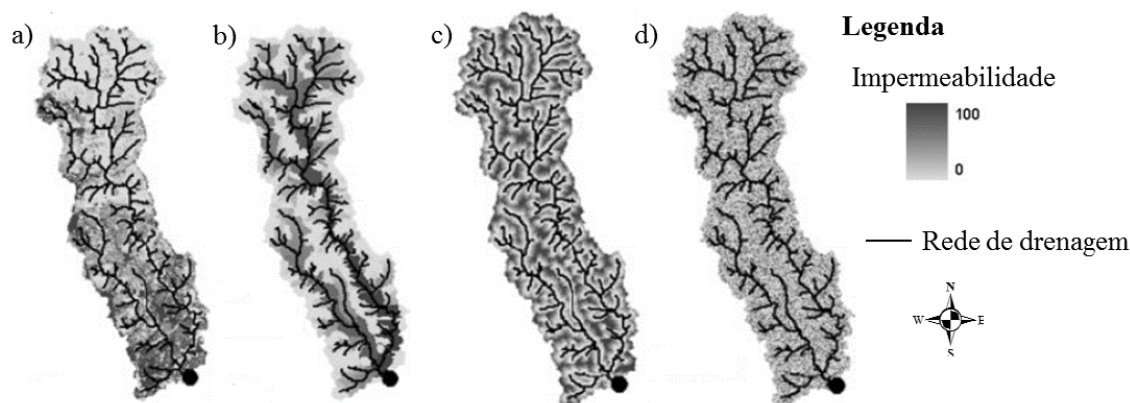


Figura 12 - Distribuição da impermeabilidade em diferentes cenários: (a) atual, (b) agregação de canais, (c) agregação de mananciais e (d) uniformidade
Fonte: Adaptado de Mejia e Moglen (2010)

Saravan e Manjula (2015) mencionam que o armazenamento da água em bacias hidrográficas depende de suas propriedades geomorfológicas. Ainda segundo os autores, muitas das metodologias do HUT empregadas na literatura consideram o armazenamento da água constante. Porém, para Rodriguez e Valdes (1979) essa teoria não é aceita, haja vista que a precipitação é variável no espaço e no tempo.

Ainda do trabalho de Saravan e Manjula (2015), os mesmos desenvolveram uma rotina em FORTRAN para estimativa do escoamento superficial utilizando o princípio dos reservatórios lineares. A eficiência do modelo foi avaliada através do cálculo do percentual de erro da vazão de pico e do tempo de pico. Foi utilizado o modelo conceitual de Nash para análise comparativa. Alguns dos parâmetros de entrada, como os geomorfológicos, foram extraídos de SIGs. A Tabela 10 ilustra o resumo dos resultados obtidos.

Tabela 10 - Comparação do percentual de erro dos parâmetros Q_p e T_p

Evento	Dados observados		Modelo de Nash			Modelo proposto		
	Q_p (m^3/s)	T_p (horas)	Q_p (%)	T_p (%)	NSE	Q_p (%)	T_p (%)	NSE
05/08/1999	157,50	8	22,86	0,00	0,76	22,60	0,00	0,81
25/10/1999	103,50	7	19,77	-28,57	0,83	14,59	-14,29	0,96
21/07/1999	116,50	8	-6,27	-25,00	0,81	-10,39	0,00	0,90
02/08/1999	114,50	5	7,95	-20,00	0,86	6,03	0,00	0,85
19/11/2000	61,50	6	3,30	-16,67	0,79	13,80	0,00	0,92

Fonte: Saravan e Manjula (2015)

Para Ajmal e Kim (2015), vários estudos recentes mostram que a hipótese da consideração de 20% para as abstrações iniciais é ambígua e que valores entre 0,01 e 0,05 são mais realistas. Entretanto, na literatura há uma variedade de estudos que tentam entender melhor a variação desses valores (Barroso, Gonzáles e Valdés, 2016; Christianson et al., 2016; Ajmal et al., 2015; Asaro et al., 2014; Jena et al., 2012). Fato é que o uso do solo, a geomorfologia, como também a característica do evento, são umas das características que podem de certa forma responder a essas variações.

3. METODOLOGIA

3.1. Área de estudo

Considerando como estudo de caso, foi tomada uma subbacia hidrográfica do Arroio Dilúvio, localizada no município de Porto Alegre – RS, Brasil. Esta é a principal bacia hidrográfica da cidade, englobando os municípios de Porto Alegre e Viamão, ambos do Estado do Rio Grande do Sul. O Arroio Dilúvio nasce nos limites dos municípios de Porto Alegre e Viamão, com escoamento de suas águas no sentido leste-oeste (Figura 13).

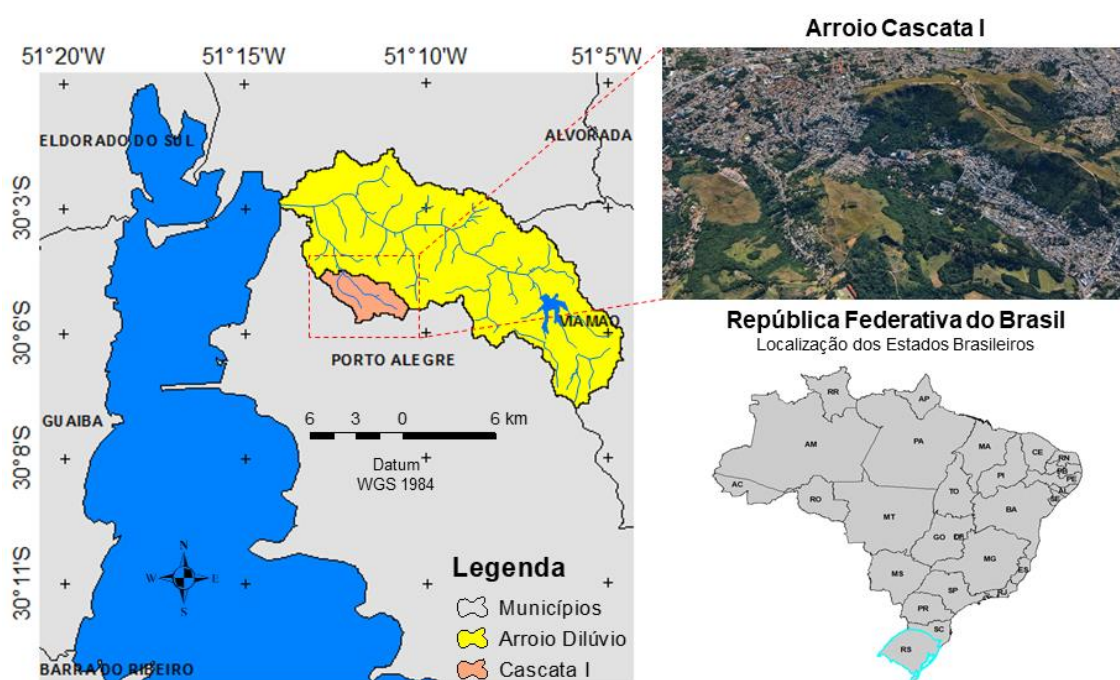


Figura 13 - Localização dos Arroios Dilúvio e Cascata I

Fonte: Autoria própria

Em virtude da localização estratégica, o Arroio Dilúvio é a mais importante bacia hidrográfica do município de Porto Alegre. A bacia hidrográfica abrange uma área de aproximadamente 83,74 km², apresentando aproximadamente 17 km de curso de rio principal. Seus principais afluentes são os arroios: Mato Grosso, Moinho, Cascata e Águas Mortas (Mog, Campos e Piccinini 2014).

A escolha da referida bacia hidrográfica como área de estudo para a presente pesquisa se deu em virtude da disponibilidade de dados observados de chuva-vazão das décadas de 70/80 de algumas de suas subbacias hidrográficas. Para tanto, foi tomada a bacia hidrográfica do Arroio Cascata I que ocupa uma área de aproximadamente 4,98 km² do total da área do Arroio Dilúvio, apresentando uma impermeabilidade do solo de 27%.

3.2. Dados hidrológicos

A bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio, entre os anos de 1978 e 1982, foi monitorada por 11 linígrafos e 14 pluviógrafos (Figura 14). Os aparelhos tinham uma autonomia semanal, coletando informações a cada 30 minutos. Todas as informações coletadas foram digitalizadas e registradas em planilhas de papel. Em função de panes nos instrumentos ou contratempos de outros tipos, existem falhas nos dados monitorados que foram parcialmente preenchidas (Silveira, 2000).

Foram selecionados 21 eventos de precipitação e de vazão da bacia hidrográfica Cascata I, procurando-se atender as hipóteses intrínsecas ao modelo do HU, tais eventos são brevemente caracterizados no item 4.1.

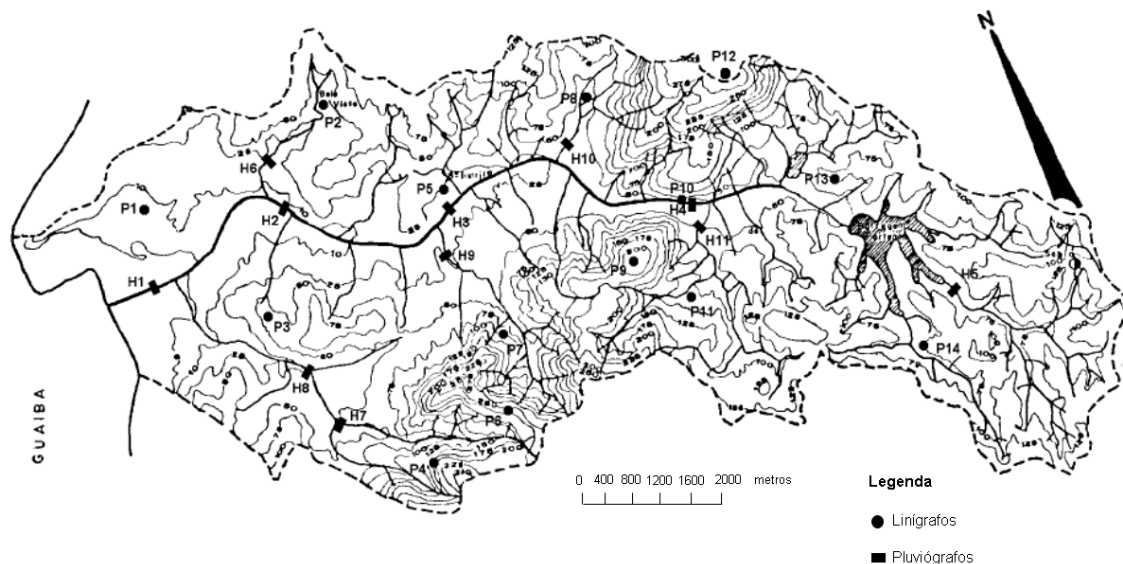


Figura 14 – Localização dos linígrafos e pluviógrafos ao longo do Arroio Dilúvio
Fonte: Silveira 2000

3.3. Visão geral

A metodologia utilizada neste estudo consiste em adaptar os métodos NRCS-CN-HU para funcionar de forma distribuída pixel a pixel. Para isso, é necessário previamente o processamento e caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica a partir do MDE.

A Figura 15 ilustra o fluxograma que aborda as principais etapas metodológicas desta pesquisa. Na etapa 1, é realizado um pré-processamento do MDE da região para obtenção das direções de fluxo, rede de drenagem e delimitação da bacia hidrográfica. Na etapa 2, são produzidos os mapas de uso do solo e do grupo hidrológico dos solos. Na etapa 3 é realizada a adaptação do modelo de cálculo de precipitação excedente e de aplicação do hidrograma unitário para distribuído por pixel. E na 4 e última etapa, é realizado o processo de calibração e validação do modelo proposto. Todas essas etapas são discutidas com mais ênfase a seguir.

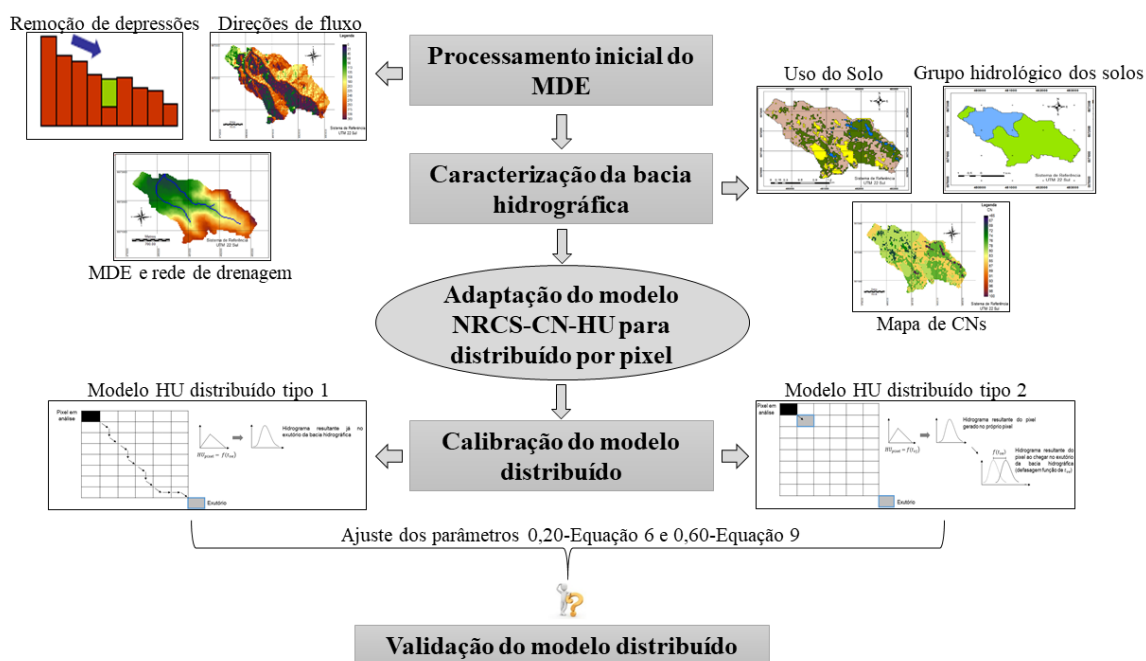


Figura 15 - Fluxograma das principais etapas metodológicas
Fonte: Autoria própria

3.4. Modelo digital de elevação: fonte de dados e processamento inicial

Foi utilizado o MDE proveniente dos dados do Serviço de Geologia dos EUA (USGS-SRTM) disponível gratuitamente no link: <http://earthexplorer.usgs.gov/>, com resolução espacial de aproximadamente 30 metros (Figura 16).

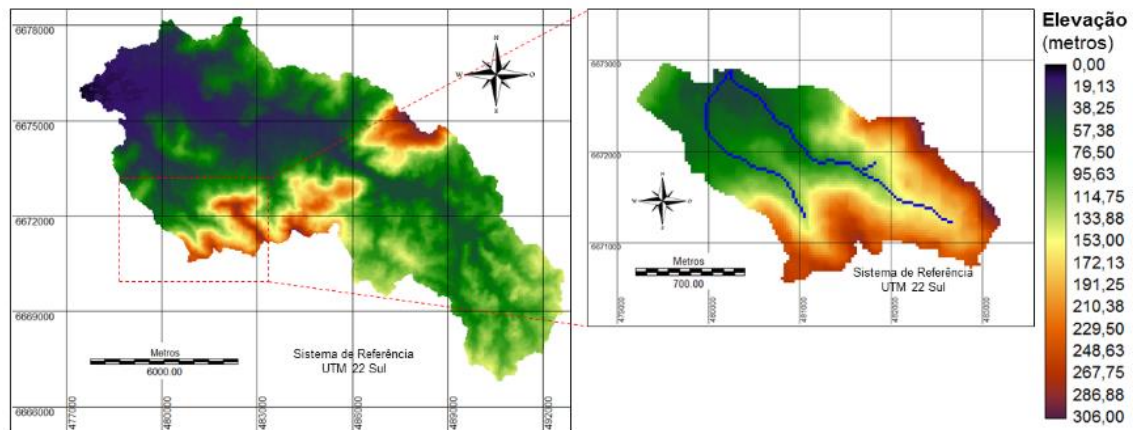


Figura 16 - MDE dos Arroios Dilúvio e Cascata I
Fonte: Autoria própria

É importante ressaltar que foi realizado o procedimento de correções das depressões do MDE, para gerar os arquivos de entrada necessários no cálculo do tempo de deslocamento do escoamento superficial nos pixels, dentre estes, estão: direções de fluxo, rede de drenagem e da delimitação da bacia hidrográfica.

As direções de fluxo (Figura 17) foram obtidas através da direção preferencial do escoamento superficial de cada pixel com base no MDE, considerando que cada pixel escoar para um de seus 8 vizinhos (D8) ou *deterministic eighth-neighbours* (Jenson e Domingue, 1988), conforme ilustrado na Figura 18.

Os ângulos de cada pixel apresentado na Figura 18 contêm a informação de qual pixel vizinho é responsável pela contribuição do escoamento superficial no pixel analisado (pixel central), sendo a distância na ortogonal igual a dx (própria resolução do pixel) e na diagonal igual a $\sqrt{2} * dx$.

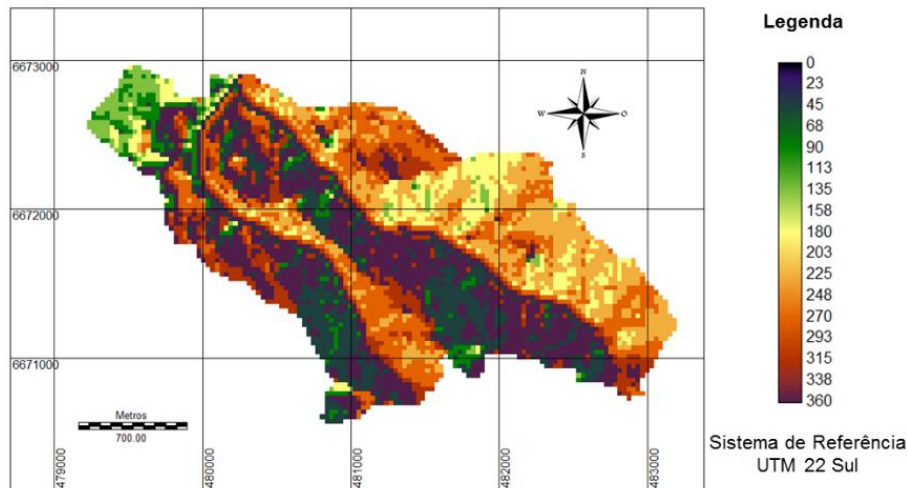


Figura 17 - Direções de fluxo do Arroio Cascata I

Fonte: Autoria própria

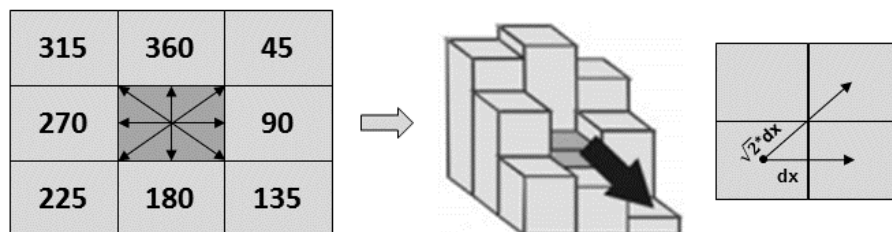


Figura 18 - Esquema representativo de traçado das direções de fluxo

Fonte: Autoria própria

A partir das áreas acumuladas obtidas pela direção preferencial do escoamento superficial com base no MDE e da identificação do exutório da bacia hidrográfica, foi realizada a delimitação da bacia hidrográfica (Figura 16). Posteriormente, foi determinada a rede de drenagem a partir da camada de áreas acumuladas, assumindo o início da rede de drenagem em função de um limiar de área acumulada mínima (Fan et al., 2013). Esse limiar foi escolhido por tentativa, de modo a que a rede de drenagem ficasse mais semelhante possível à rede gerada por Hasenack et al. (2008), tomada como referência.

Hasenack et al. (2008) inicialmente confrontaram a hidrografia gerada pela prefeitura municipal de Porto Alegre com as geradas pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSGE), observando-se algumas incoerências. Em virtude disso, a mesma foi confrontada com as imagens orbitais do satélite Quickbird, permitindo uma melhor visualização e complemen-

tação dos trechos que não haviam sido concebidos anteriormente, entretanto, apresentou dificuldades em trechos com vegetação densa. Para isso, foi realizado o cruzamento desta rede de drenagem com as geradas pelo o modelo numérico de terreno (MNT), com resolução espacial de 5 metros. O resultado foi uma representação do traçado da rede drenagem de melhor qualidade, contudo, podendo ser melhorado. Em todos os casos, os produtos foram hierarquizados pela metodologia de Strahler.

3.5. Mapas de uso e grupo hidrológico dos solos

Para elaboração do mapa de uso do solo, foram consideradas imagens de satélite referentes ao mês de agosto do ano de 1987. As imagens são provenientes do sensor/satélite TM/Landsat-5 (bandas espectrais: 3, 4 e 5), passagem de 23 de agosto de 1987, disponíveis gratuitamente no site Global Land Cover Facility (GLCF) no link: <http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/ftp?id=14522>.

Para interpretação das imagens do uso do solo, foi utilizada a classificação por Máxima Verossimilhança (MAXVER), considerada uma das técnicas de classificação supervisionada mais utilizadas no processamento de imagens de satélites (Richards, 1999). Esse método considera cada pixel pertencente a apenas uma classe, sendo considerado neste estudo quatro classes: corpos hídricos, vegetação, área urbana e solo exposto (Figura 19).

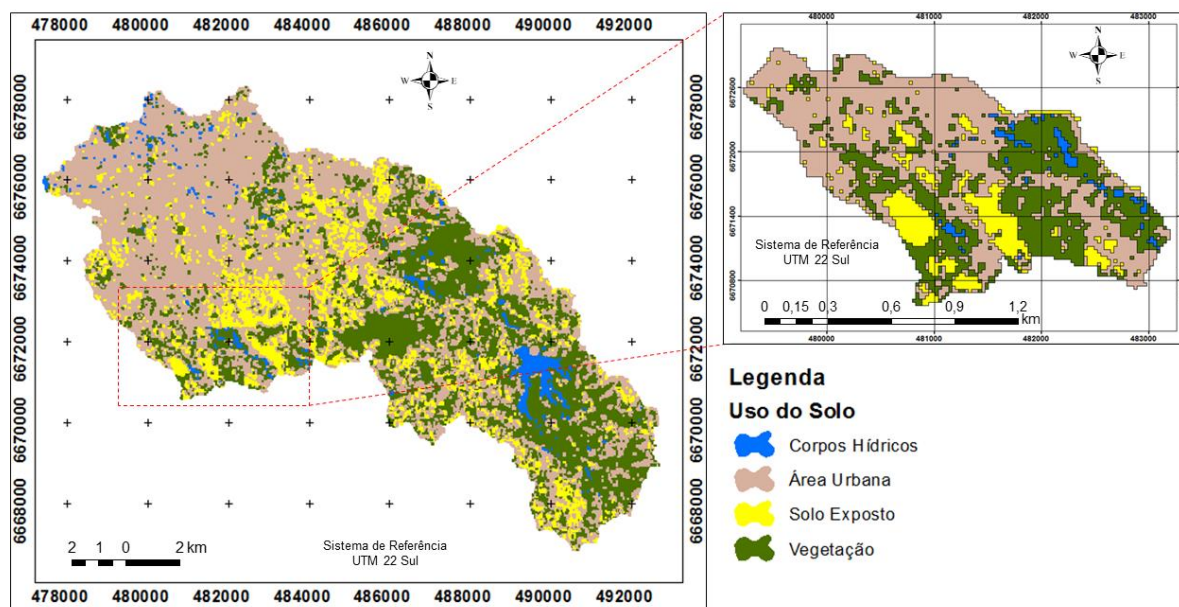


Figura 19 - Características de uso do solo dos Arroios Dilúvio e Cascata I
Fonte: Autoria própria

Conforme a figura anterior (Figura 19) o Arroio Dilúvio (mapa da esquerda) com área total de aproximadamente 77,84 km², nas décadas 70/80 tinha maior parte de sua área coberta pela vegetação, ocupando cerca de 56,82% de sua área total, seguido do solo exposto com 30,90% (Tabela 11).

O uso do solo aqui relatado é bem semelhante do resultado da classificação de Alves (2004) em estudo sobre estimativas de áreas impermeáveis do Arroio Dilúvio, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. Cabe ressaltar que o autor utilizou a mesma metodologia de classificação adotada neste estudo (MAXVER) e as imagens foram provenientes do sensor/satélite TM/Landsat-5 (bandas espectrais: 1 a 5 e 7), passagem de 23 de agosto de 1987.

Tabela 11 - Porcentagem de uso do solo do Arroio Dilúvio

Uso do Solo	Área	
	%	km ²
Água	1,80	1,40
Vegetação	56,82	44,23
Área Urbana	10,48	8,16
Solo Exposto	30,90	24,05

Fonte: Autoria própria

Quanto ao mapa do grupo hidrológico dos solos, o mesmo foi elaborado a partir da identificação dos tipos de solos do município de Porto Alegre disponibilizada por Hasenack et al. (2008) e do mapa dos tipos de solos brasileiros elaborado pela EMBRAPA e disponibilizada pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI) no link: http://www.dpi.inpe.br/Amb-data/mapa_solos.php.

Os Tipos solos foram classificados quanto ao grupo hidrológico NRCS-CN, segundo recomendações de Sartori et al. (2005), que relacionam os tipos de solos adotados pela classificação brasileira e os tipos de solos adotados pela classificação hidrológica do modelo NRCS-CN. Dessa maneira, fazendo algumas considerações e generalizações, foi possível fazer uma correspondência entre cada tipo de solo encontrado na bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio e um grupo hidrológico do modelo NRCS-CN.

Observa-se na Figura 20 (mapa da esquerda) que de acordo com a classificação descrita acima, o Arroio Dilúvio apresenta Grupos hidrológicos dos tipos C e D, sendo o grupo hidrológico do tipo C o de maior predominância, ocupando cerca de 62,62% (Tabela 12) da área total da bacia hidrográfica. Ainda analisando a Figura 20 (mapa da direita), nota-se que a Cascata I apresenta cerca de 70,50% (Tabela 11) de sua área total os tipos de solos que se enquadram no grupo hidrológico D. Campana et al. (1995) estudando o parâmetro CN para algumas subbacias hidrográficas do Arroio Dilúvio, chegaram aos mesmos grupos hidrológico dos solos da Cascata I, aqui relatado, ou seja, grupo hidrológico C e D.

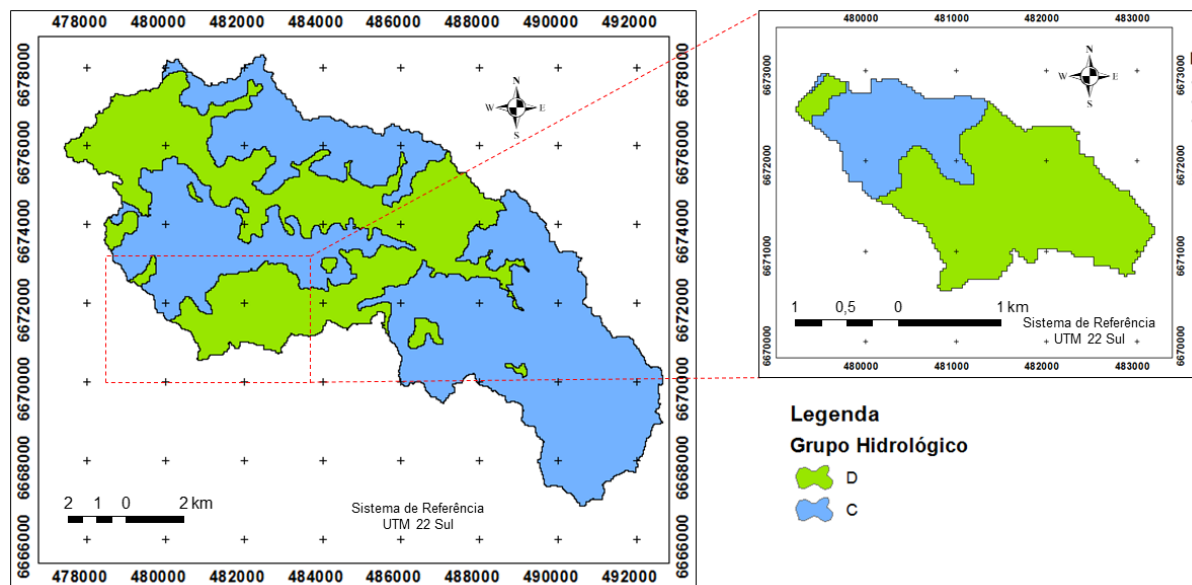


Figura 20 - Grupo hidrológico dos solos dos Arroios Dilúvio e Cascata I
Fonte: Autoria própria

3.6. Adaptação do modelo NRCS-CN-HU

3.6.1. Cálculo do tempo de deslocamento

Para a aplicação da abordagem NRCS-CN-HU de forma distribuída pixel a pixel, é necessária a determinação dos tempos de deslocamentos do escoamento originado em cada pixel até o exutório da bacia hidrográfica.

Para os trechos de escoamento em superfície, é empregada a Equação 20. Ao longo do traçado do caminho de fluxo, cada alteração no uso do solo delimita o final de um subtrecho para aplicação da Equação 20.

$$T_{ds} = \frac{5,474 * (\eta * L)^{0,8}}{P_{24}^{0,5} * S^{0,4}}$$

Equação 20

Sendo η o coeficiente de rugosidade de MANNING; P_{24} a lâmina de precipitação excedente ocorrido em 24 horas (mm); L o comprimento (metros) e T_{ds} o tempo de deslocamento do escoamento na superfície (s).

O P_{24} é estimado a partir do período de retorno do evento. Para isso, foi utilizada uma das IDEs recomendadas para a cidade de Porto Alegre (Equação 21), definida especificamente para a região dos bairros: Vila Ipiranga (região sul do bairro), Jardim Itu-Sabará (região sul do bairro), Boa Vista (região sul), Mont Serrat (região leste), Bela Vista (região leste), Três Figueiras, Chácara das Pedras, Vila Jardim, Petrópolis, Bom Jesus, Jardim Carvalho, Partenon, Jardim Botânico, Jardim do Salso, Nonoai (região leste), Teresópolis, Glória, Cel. Aparício Borges, Vila João Pessoa, São José, Ipanema (região sul), Vila Nova, Cascata, Espírito Santo, Aberta dos Morros (região oeste), Belém Velho (região oeste), Guarujá, Hípica (região oeste), Serraria, e Ponta Grossa (região oeste) (DEP, 2005). Para os eventos em que os períodos de retorno foram inferiores a 2 anos, foi considerado um período de retorno de 2 anos.

$$i = \frac{1297,9 * T_r^{0,171}}{(d + 11,6)^{0,85}}$$

Equação 21

Sendo i a intensidade da precipitação (mm/h); d a duração da precipitação (minutos) e T_r o período de retorno (anos).

Os comprimentos foram obtidos determinando-se as distâncias percorridas ao longo dos caminhos de fluxo estabelecidos em função das direções de fluxo. A cada passo ortogonal entre dois pixels, soma-se o tamanho do pixel (dx) à distância percorrida. A cada passo diagonal entre dois pixels, soma-se $\sqrt{2}$ vezes a dimensão do pixel.

Para a obtenção das declividades foi utilizado o método das declividades individuais (Serra, 2017), que considera que é possível determinar o tempo de deslocamento de um subtrecho através da soma dos tempos individuais de deslocamento de cada pixel pertencente ao subtrecho até o seu vizinho, utilizando a fórmula do NRCS. Essa concepção poderia gerar indeterminações de cálculo no caso de pixels com declividades pequenas ou nulas. Entretanto, na utilização desse método, faz-se uma imposição de declividade mínima, de forma que, caso existam

pixels vizinhos de mesma cota ou cotas próximas, o método automaticamente considera uma declividade mínima que permite a realização do cálculo de forma coerente, sem gerar prejuízos aos resultados.

O método calcula uma declividade para cada pixel do subtrecho (S_{P1} , S_{P2} , S_{P3} , $S_{P4}, \dots$) em função da extensão do pixel e das diferenças de cotas entre o pixel e seu vizinho (Equação 22).

$$S_{Pn} = \frac{C_{Pn} - C_{Pn+1}}{L}$$

Equação 22

Sendo S_{Pn} a declividade do pixel n (metros/metros), C_{Pn} a cota do pixel n (metros) e C_{Pn+1} a cota do pixel vizinho $n+1$ (metros).

O tempo de deslocamento de cada pixel dentro do subtrecho é determinado através da fórmula do NRCS (Equação 20), sendo o tempo total o somatório dos tempos de cada pixel pertencente ao subtrecho até seu vizinho. Assim, considerando um trecho com quatro pixels, tem-se:

$$T_T = \frac{5,474 * (n * L_{P1})^{0,8}}{P_{24}^{0,5} * S_{P1}^{0,4}} + \frac{5,474 * (n * L_{Pn})^{0,8}}{P_{24}^{0,5} * S_{Pn}^{0,4}} + \dots + \frac{5,474 * (n * L_{P4})^{0,8}}{P_{24}^{0,5} * S_{P4}^{0,4}}$$

Equação 23

Sendo T_T o tempo de deslocamento total do subtrecho (minutos) e L_{Pn} a distância do pixel n até o pixel $n+1$ (metros).

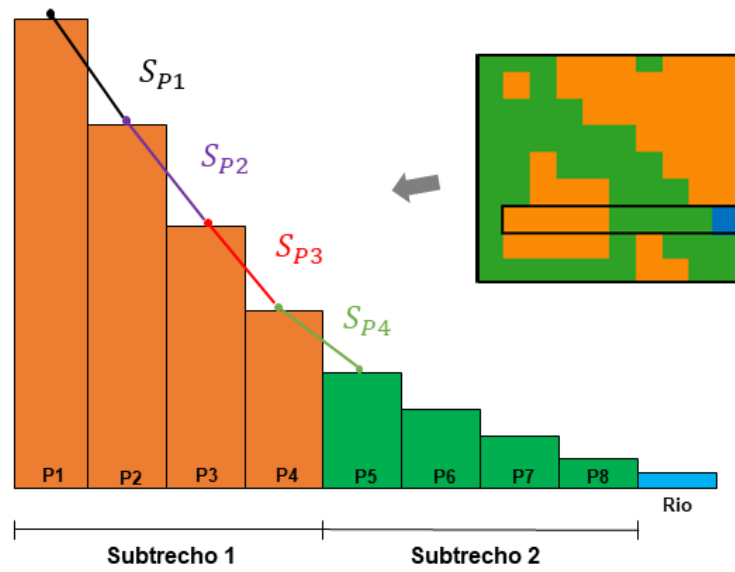


Figura 21 - Exemplo de obtenção da declividade
Fonte: Autoria própria

Os tempos de deslocamento do escoamento superficial dos pixels intermediários em cada subtrecho, são calculados utilizando-se a fórmula do NRCS (Equação 20), considerando a declividade (S) constante e igual à declividade do subtrecho para todos os pixels dentro do referido subtrecho.

No cálculo do tempo em canais, é realizada a divisão do rio em diferentes classes, de acordo com a uniformidade das características geométricas (Figura 22). O procedimento consiste na aplicação da equação de MANNING (Equação 24) para estimativa do tempo de deslocamento do escoamento no canal (Equação 25).

$$V = \frac{Rh^{2/3} * S^{1/2}}{n}$$

Equação 24

Sendo V a velocidade do escoamento no canal (m/s) e Rh o raio hidráulico (m).

$$T_{dc} = \frac{L}{V}$$

Equação 25

Sendo T_{dc} o tempo de deslocamento do escoamento no canal (s).

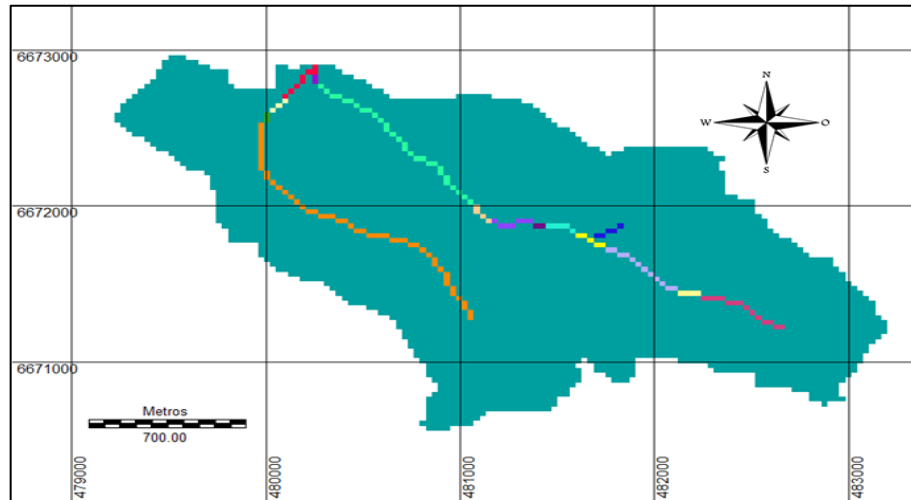


Figura 22 - Divisão das classes dos trechos e subtrechos dos canais do Arroio Cascata I

Fonte: Autoria própria

No caso do raio hidráulico, sabe-se que na época os canais não eram totalmente naturais, em alguns trechos já existiam canais artificiais (galerias). Entretanto, devido à falta de informações referentes às características desses trechos da época dos dados observados (área e perímetro) foi utilizada a Equação 26 e a partir das dimensões (largura e altura) dos canais artificiais utilizados no Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre (DEP, 2014) estimou-se o valor do raio hidráulico em cada trecho.

$$Rh = \frac{\left(b + \left(\frac{1}{m} * h\right)\right) * h}{b + 2 * h * \left(\sqrt{1 + \left(\frac{1}{m}\right)^2}\right)}$$

Equação 26

Sendo b a largura do fundo do canal (m); $\frac{1}{m}$ a relação do talude do canal, sendo considerado nesse estudo uma relação de 1/2 e h a altura do canal (m).

Os trechos a montante e jusante das galerias foram considerados como canais naturais, levando-se em conta as mesmas dimensões das galerias, entretanto, atribuindo-os valores de coeficiente de MANNING recomendados para canais naturais, descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores de MANNING para diferentes tipos de superfície ou revestimento de canais

Valores do coeficiente de MANNING			
Superfície		Canal	
Corpos hídricos	1,000	Concreto	0,016
Vegetação	0,130	Natural	0,050
Área urbana	0,024		
Solo exposto	0,150		

Fonte: Adaptado de Canholli (2005)

Os valores das declividades em cada classe foram obtidos pelo quociente entre a diferença do valor da elevação (cota) e comprimento correspondente ao trecho. Os valores das elevações foram obtidos a partir do MDE, e os comprimentos medidos ao longo da rede de drenagem vetorial considerando-se o comprimento real do trecho.

Por fim, foi determinado o tempo de deslocamento total, sendo que ao longo dos trajetos são encontrados tanto trecho em superfície e em canal. Foram então somados os tempos de deslocamentos relacionados a cada trecho e subtrecho em superfície com os trechos em canais.

3.6.2. Cálculo da precipitação excedente

A precipitação excedente foi estimada pelo modelo da curva número do NRCS. O modelo distingue três condições quanto à umidade antecedente do solo, sendo considerada para este trabalho a Condição II de umidade antecedente do solo (Condição média). Tal decisão está relacionada à falta de informações dos eventos ocorridos nos últimos 5 dias que antecede cada evento, como assim é recomendado (USDA-NRCS, 2004).

As estimativas dos valores de CNs (Tabela 13) foram realizadas a partir das tabelas descritas no tópico 2.3.1 da fundamentação teórica que fornece valores de CN para diferentes grupos hidrológicos dos solos e respectivas condições de uso do solo.

Tabela 13 - Valores de CNs da bacia hidrográfica Cascata I de acordo com o grupo hidrológico dos solos

Uso do Solo	CN	Grupo Hidrológico	Área	
			%	km ²
Vegetação	70	C	4,62	0,23
Área Urbana	80		23,29	1,16
Solo Exposto	74		1,61	0,08
Corpus hídricos	100	D	2,41	0,12
Vegetação	77		27,91	1,39
Área Urbana	85		28,51	1,42
Solo Exposto	80		11,65	0,58

Fonte: Autoria própria

Após a definição das condições de umidade antecedente do solo, os mapas de uso e grupo hidrológico dos solos foram convertidos em formato de imagem raster e cruzados. É determinado o CN para cada combinação entre o uso e grupo hidrológico dos solos, sendo adotado um valor de CN para cada pixel que compõe a imagem raster de representação da área (Figura 23). Conforme o CN atribuído a cada pixel têm-se as perdas iniciais estimadas e o valor de armazenamento máximo S estimados, isso significa que cada pixel vai gerar um hietograma de precipitação excedente.

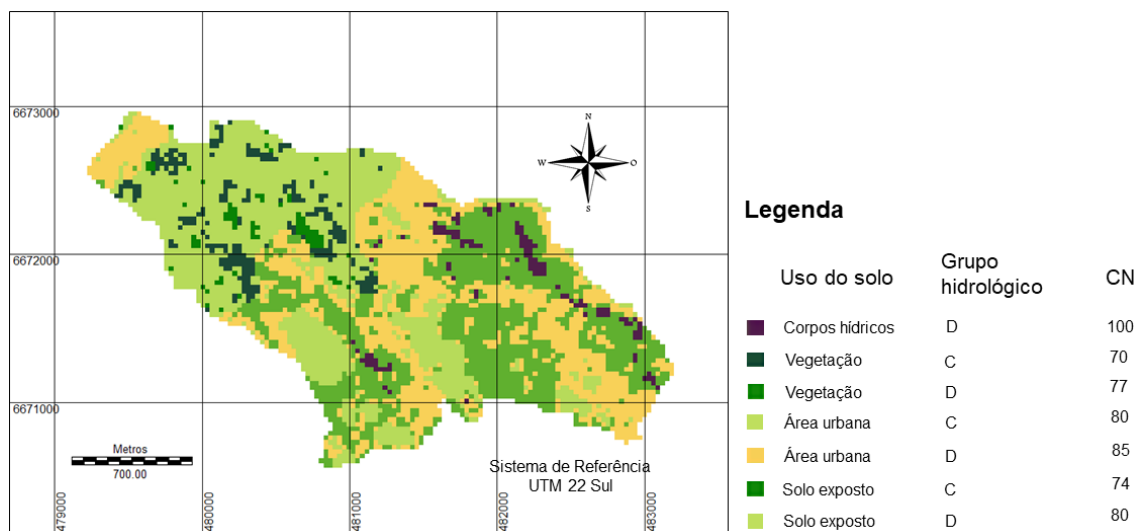


Figura 23 - Mapa de CNs do Arroio Cascata I

Fonte: Autoria própria

3.6.3. Aplicação do modelo do hidrograma unitário distribuído

Para o cálculo do hidrograma unitário foi considerada uma duração d de 1 minuto da precipitação efetiva unitária, e que por sua vez, foi a mesma duração d dos intervalos de tempo sobre os quais a precipitação observada foi dividida.

Duas variantes do modelo do hidrograma unitário distribuído foram desenvolvidas, descritas a seguir.

Hidrograma unitário distribuído do tipo HU_{exe}

Na primeira variante, chamado aqui de HU_{exe} , o HU de cada pixel é determinado em função do tempo de viagem do escoamento superficial desde o pixel até o exutório da bacia hidrográfica (t_{ve} , Figura 24). O valor de t_{ve} é considerado como o tempo de concentração na formulação do HUT do NRCS (Equações 9 e 11), e a área do pixel tomada como a área da bacia hidrográfica.

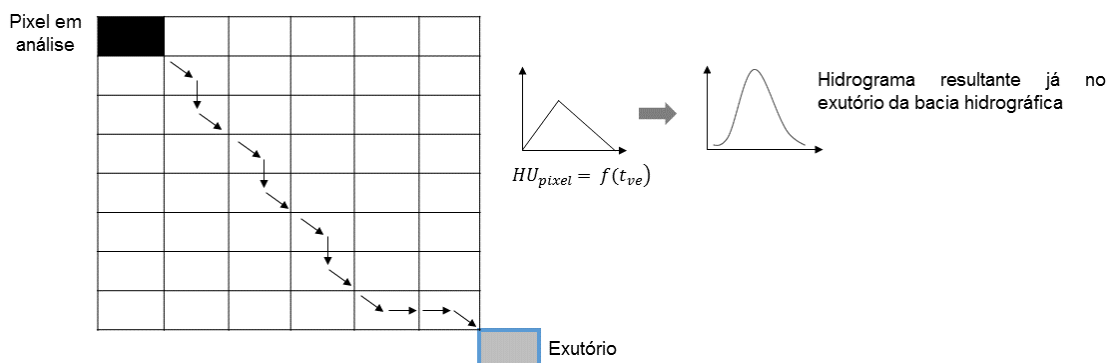


Figura 24 - Esquema representativo da variante HU_{exe} do método do hidrograma unitário distribuído
Fonte: Autoria própria

Assume-se uma representação em que cada pixel é tratado como uma bacia hidrográfica de área igual a sua área superficial (própria resolução do pixel), mas cujo tempo de escoamento superficial é medido em função do caminho percorrido desde o pixel até o exutório da bacia hidrográfica real.

Em cada pixel, é obtido o hidrograma gerado por cada um dos blocos de precipitação excedente (precipitação efetiva), através do princípio da proporcionalidade. Lembrando que

cada pixel possui uma precipitação efetiva em função do seu CN característico. Depois disso, aplicando o princípio da superposição, geram-se os hidrogramas resultantes para cada um dos pixels. Esses hidrogramas são a resposta hidrológica de cada pixel já no exutório da bacia hidrográfica, por já ter incorporado o valor de t_{ve} no equacionamento do HUT. A superposição direta de todos os hidrogramas resultantes dos pixels leva ao hidrograma resultante final da bacia hidrográfica real.

Hidrograma unitário distribuído do tipo HU_{jus}

Nesta segunda variante do método, denominada HU_{jus} , o HU de cada pixel é determinado em função do tempo de deslocamento do escoamento superficial dentro do próprio pixel, ou seja, até alcançar o pixel imediatamente a jusante (t_{vj} , Figura 25).

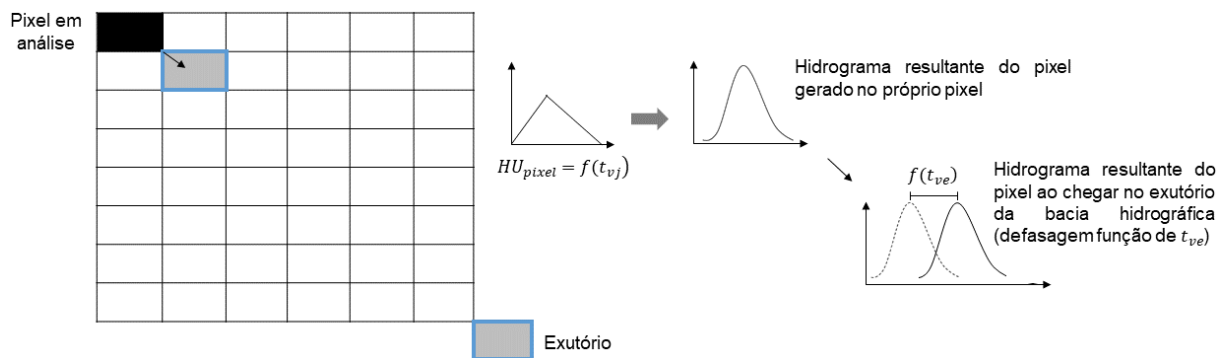


Figura 25 - Esquema representativo da variante HU_{jus} do método do hidrograma unitário distribuído
Fonte: Autoria própria

O valor de t_{vj} é considerado como o tempo de concentração na formulação do HUT do NRCS (Equações 9 e 11), e a área do pixel tomada como a área da bacia hidrográfica. Assume-se uma representação em que cada pixel é tratado como uma bacia hidrográfica de área igual a sua área superficial (própria resolução do pixel) e tempo de concentração dado pelo tempo até alcançar o pixel a jusante, o que se assemelha mais ao conceito original de t_c .

Para cada pixel, pelo processo de convolução e princípios de proporcionalidade e superposição, obtêm-se o hidrograma resultante gerado no próprio pixel. Entretanto, esse hidrograma é a resposta hidrológica de cada pixel ao alcançar o pixel a jusante.

Como o interesse é em saber a resposta no exutório da bacia hidrográfica real, aplica-se uma defasagem a esse hidrograma resultante igual ao tempo de viagem do escoamento superficial do pixel até o exutório (t_{vj}). Posteriormente, com a superposição direta de todos os hidrogramas resultantes dos pixels defasados até o exutório, obtém-se o hidrograma resultante final da bacia hidrográfica.

3.6.4. Rotina computacional e dados de entrada

Todos os procedimentos, desde a determinação do tempo de deslocamento do escoamento superficial, o cálculo da precipitação excedente e a obtenção do hidrograma unitário resultante total, foram aplicados com o auxílio de rotinas computacionais desenvolvidas em linguagem Fortran, pelo grupo de pesquisa ao qual este trabalho está vinculado.

A Tabela 14 apresenta um breve resumo dos principais arquivos de entrada que o modelo proposto requer.

Tabela 14 - Principais arquivos de entrada para obtenção do hidrograma resultante total

Arquivos de entrada	Descrição
Coeficiente de MANNING	Coeficiente de MANNING correspondente aos tipos de usos do solo existente na região
Classes do rio	Divisão do rio em classes, de acordo com suas características
Características das classes do rio	Declividade, MANNING e raio hidráulico para cada classe do rio
Mapa de CN	Distribuição espacial dos valores dos CNs

Fonte: Autoria própria

Continuação da Tabela 14 - Principais arquivos de entrada para obtenção do hidrograma resultante total

Arquivos de entrada	Descrição
Delimitação da bacia hidrográfica	Delimitação da bacia hidrográfica, no formato raster
MDE	Modelo digital de elevação do terreno, com elevação em metros
Direções de fluxo	Fluxo preferencial do escoamento superficial de cada pixel com base no MDE, considerando que cada pixel escoar para um de seus 8 vizinhos
Rede de drenagem	Curso d'água (pixels com valores 1 e 0, onde 1 = pixel da rede de drenagem e 0 = pixel fora da rede)
P24	Lâmina de precipitação de 24h de duração (mm), segundo IDF da área de estudo e para o T_r do projeto
Usos do solo	Distribuição espacial dos tipos de usos do solo existentes na região

Fonte: Autoria própria

3.7. Ajuste do modelo distribuído

Inicialmente, para todos os eventos foram aplicados os métodos descritos aqui para a modelagem hidrológica distribuída NRCS-CN-HU (nas duas variantes, HU_{exe} e HU_{jus}) considerando os valores dos parâmetros empíricos inalterados em relação à formulação original.

Em seguida, para cada variante de HU foram realizadas diversas combinações de valores dos parâmetros de perdas iniciais (0,20 – Equação 6) e do fator de tempo de pico (0,60 – Equação 9). Tal escolha foi em virtude de estudos, como de Tucci (2003) e Ajmal e Kim (2015), relatarem resultados mais significativos, quando atribuídos valores menores daqueles propostos inicialmente pelo NRCS (USDA-NRCS, 1972).

O ajuste desses dois parâmetros consistiu em avaliar a influência que cada parâmetro exerce nas vazões geradas pelo modelo distribuído em relação às observadas. Para isso, foi necessário estabelecer uma faixa de valores de busca para esses parâmetros.

Inicialmente, foi definida uma faixa de valores para as perdas iniciais, que compreendeu valores entre 0,01 e 0,50. Uma outra faixa foi definida, sendo a mesma para o fator de tempo de pico, compreendendo valores de 0,05 a 0,90. Para a calibração dos parâmetros foi utilizado 1/3 dos eventos selecionados (7 eventos), e os demais para validação do modelo proposto (14 eventos), totalizando 21 eventos. A Tabela 15 apresenta a forma de como foram realizadas as combinações utilizadas para calibração do modelo.

Tabela 15 - Matriz de combinações dos parâmetros utilizados para calibração

1S1Tp	2S1Tp	3S1Tp	...	<i>nSmTp</i>
1S2Tp	2S2Tp	3S2Tp		
1S3Tp	2S3Tp	3S3Tp		
⋮				
<i>nSmTp</i>				

Fonte: Autoria própria

Sendo 1S1Tp o primeiro valor para perdas iniciais com o primeiro valor para fator de tempo de pico, 1S2Tp o primeiro valor para perdas iniciais com o segundo valor para fator de tempo de pico e assim por diante, totalizando uma matriz de 18 linhas e 18 colunas, ou seja, um total de 324 simulações. Como foram avaliados dois tipos de formulação do HU distribuído, ao total foram então 648 simulações.

Ao final, foi realizada uma análise estatística simples, para analisar a percentagem de erro relativo da vazão de pico, tempo de pico, e do volume dos dados simulados em relação aos dados observados (Equação 27).

$$Erro \text{ (\%)} = \left(\frac{(simulado - observado)}{observado} \right) * 100$$

Equação 27

3.8. Separação dos escoamentos

Os dados observados utilizados nesse estudo apresentam características de curta duração, sendo assim, a metodologia de obtenção do escoamento superficial utilizada nesse estudo foi o princípio do método do gráfico (método 2).

Resumidamente, para obtenção do escoamento superficial pelo método 2, é plotado o logaritmo das vazões em um gráfico, identificando a mudança acentuada na curva do gráfico, representado pelo início do escoamento superficial (Ponto A). Em seguida, é determinado o ponto em que a precipitação contribui para o escoamento subterrâneo (Ponto C), sendo o mesmo, identificado a partir do traçado de reta tangente ao momento em que a curva apresenta certa linearidade, conforme Figura 26.

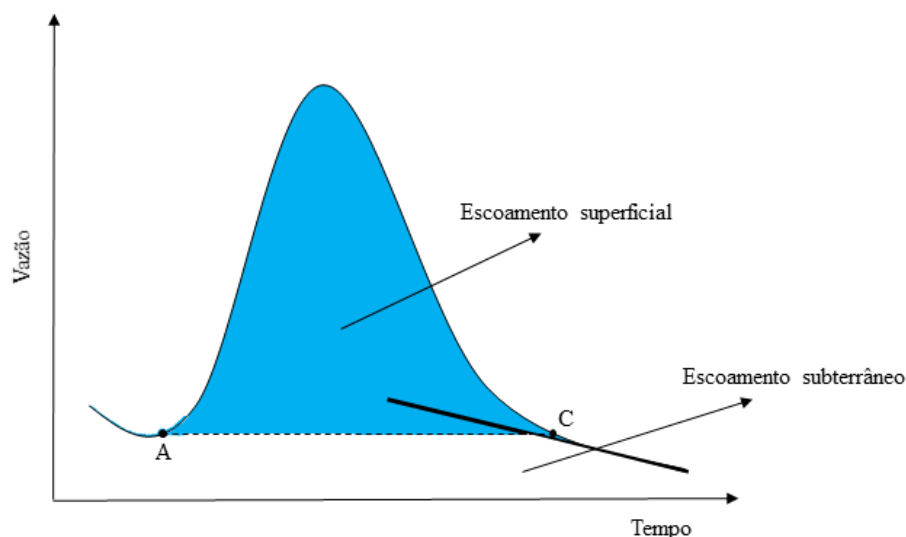


Figura 26 - Esquema representativo de obtenção do escoamento superficial
Fonte: Autoria própria

Para otimizar a separação dos escoamentos, foi desenvolvida uma rotina na linguagem MatLab[®]. O programa foi nomeado como *HydroSep* (Figura 27) e seu funcionamento é basicamente representado por duas etapas:

- Selecionam-se os arquivos de entrada (precipitação e vazão), por meio do botão *Browser*. Essas informações devem estar contidas em um arquivo *.txt. Em seguida, informa-se o valor da área da bacia hidrográfica (km²) e a variação do tempo (Δt) em minutos.

- Através do botão *Start*, o programa determina o instante onde ocorre o início do escoamento superficial, e o momento em que cessa o escoamento superficial. Por meio da equação da reta, a rotina calcula a vazão de base (vazão subterrânea) e por subtração encontra-se as vazões que escoaram superficialmente, vazão está comparada com as vazões observadas.

Além da separação dos escoamentos, o programa determina os valores da intensidade da precipitação (Equação 28), precipitação efetiva (Equação 29), coeficientes de escoamentos (Equações 30 e 31). Ainda foram determinadas outras características, como: vazão e tempo de pico, precipitação total e a duração do evento.

The interface consists of three main sections:

- File selector:** Contains fields for 'Path:' and 'File name:', along with 'Browser' and 'Start' buttons.
- Input:** Contains fields for 'Area (km²):' and 'Δt (min):'. To the right is 'Table 1: Rainfall - Runoff', which is a large empty table with a scrollbar.
- Output:** Contains 'Table 2: Characteristics of events'. This table has the following columns: Ptotal(mm), Dprec(h), Tc(h), lmax(mm/h), Pef(mm), Qp(m³/s), Tp(dt), Csuperficial, and Cglobal. It is a large empty table with a scrollbar.

Figura 27 - Interface do programa de obtenção dos escoamentos e demais características
Fonte: Autoria própria

$$I = \frac{P}{\Delta t}$$

Equação 28

$$P_{efetiva} = \left(\frac{\sum_1^i Q_{sup} * \Delta t}{(A * 10^6)} \right) * 1000$$

Equação 29

$$C_{global} = \frac{\sum_1^i Q_{obs} * \Delta t}{(P_{total} * 0,001) * A * 10^6}$$

Equação 30

$$C_{superficial} = \frac{\sum_1^i Q_{sup} * \Delta t}{(P_{total} * 0,001) * A * 10^6}$$

Equação 31

Sendo I a intensidade (mm/h); $P_{efetiva}$ é a precipitação efetiva (mm); P_{total} é a precipitação total (mm); C_{global} é o coeficiente de escoamento global; $C_{superficial}$ é o coeficiente de escoamento superficial; Δt é a variação do tempo (segundos); Q_{obs} é a vazão observada (m³/s), e Q_{sup} é a vazão superficial (m³/s).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Obtenção dos hidrogramas das vazões observadas e caracterização dos eventos

Segundo Arnold et al. (1995), uma das principais etapas realizadas inicialmente na modelagem hidrológica de bacias hidrográficas, é a separação dos escoamentos superficial (direto) e subterrâneo (base). Diante disso, e do que foi relatado no item 2.2, para a obtenção dos hidrogramas referentes ao escoamento superficial dos dados observados, estes, por sua vez, comparados com os hidrogramas gerados pelo modelo distribuído, foi aplicado a metodologia do método do gráfico.

A Figura 28 apresenta um exemplo de separação dos escoamentos (direto e de base) pelo o método do gráfico para um dos eventos utilizados durante a calibração e validação da abordagem distribuída.

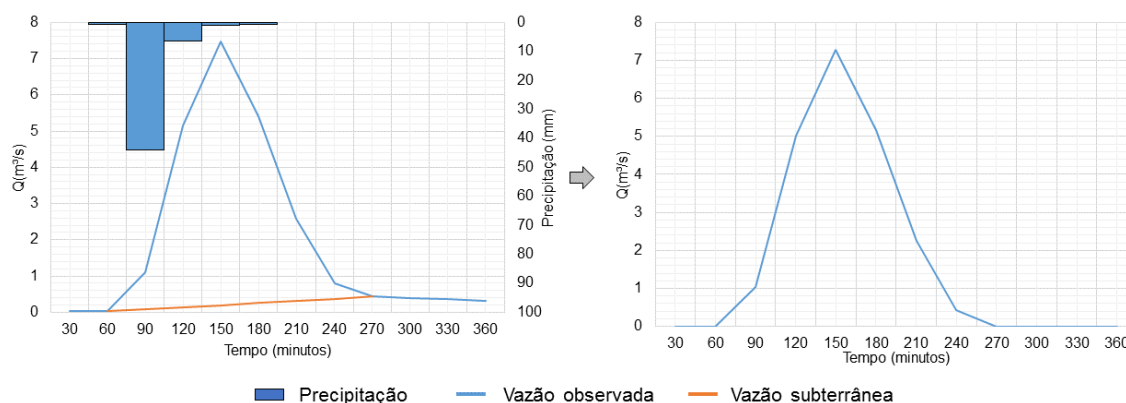


Figura 28 - Separação dos escoamentos superficial e subterrâneo

Fonte: Autoria própria

A Tabela 16 apresenta o resumo da caracterização dos eventos. Em linhas gerais, observa-se que os eventos apresentam características de curta duração, com precipitação mínima de 7,02 (mm), média de 19,40 mm e máxima de 52,84 (mm), e intensidade máxima de 88,28 (mm/h). Em termos de escoamento, os eventos apresentam faixas de valores que variam entre 0,07 e 0,27 para o coeficiente de escoamento superficial e entre 0,09 e 0,33 para o coeficiente de escoamento global, apresentando vazão máxima de 7,48 (m^3/s).

Tabela 16 - Característica dos eventos selecionados do Arroio Cascata I

ID do Evento	Data	Precipitação					Escoamento		
		P _{total} (mm)	D _{prec} (h)	T _c (h)	I _{máx} (mm/h)	Q _p (m³/s)	T _p (h)	C _{superficial}	C _{global}
PA090180	09/01/1980	13,03	2,50	1,50	24,00	3,13	4,00	0,25	0,33
PA050280	05/02/1980	11,50	1,00	3,00	21,00	2,88	2,50	0,20	0,28
PA160280	16/02/1980	21,51	4,00	0,50	27,00	5,31	2,50	0,24	0,33
PA240280	24/02/1980	13,01	3,50	1,50	18,00	2,54	2,50	0,19	0,26
PA110380	11/03/1980	12,61	2,00	2,00	21,60	1,97	2,50	0,15	0,19
PA250380	25/03/1980	17,25	1,50	2,00	34,16	2,70	2,50	0,17	0,23
PA310580	31/05/1980	27,34	1,50	2,50	47,68	4,00	2,00	0,15	0,20
PA300680	30/06/1980	11,40	2,50	1,50	11,20	0,61	2,00	0,07	0,10
PA170880	17/08/1980	28,02	3,00	3,50	21,52	3,75	3,50	0,27	0,32
PA310880	31/08/1980	17,62	4,00	1,50	10,60	1,92	3,50	0,13	0,19
PA070279	07/02/1979	18,66	3,00	2,50	21,44	3,34	3,50	0,26	0,32
PA050479	05/04/1979	7,02	2,00	3,00	8,00	0,89	3,50	0,17	0,29
PA290479	29/04/1979	26,75	5,00	2,50	21,92	1,79	7,00	0,07	0,09
PA250879	25/08/1979	12,20	1,50	3,00	18,80	1,42	2,50	0,13	0,20
PA240979	24/09/1979	12,60	1,00	3,00	22,00	0,99	2,00	0,07	0,10
PA250979	25/09/1979	39,60	4,00	2,00	24,80	3,65	3,50	0,13	0,16
PA171179	17/11/1979	28,53	5,00	3,00	18,28	2,56	5,00	0,14	0,18
PA061279	06/12/1979	7,54	2,00	4,50	8,28	0,49	5,00	0,08	0,10
P3061279	06/12/1979	14,02	3,00	2,00	17,20	1,71	3,50	0,11	0,12
PA081279	08/12/1979	14,40	1,50	4,50	27,24	1,49	4,00	0,15	0,16
PA121279	12/12/1979	52,84	2,50	1,50	88,28	7,48	2,50	0,14	0,19

Legenda: ID do evento = Identificação do evento; P_{total} = Precipitação total; D_{prec} = Duração da precipitação; T_c = Tempo de concentração; I_{máx} = Intensidade máxima; P_{ef} = Precipitação efetiva; Q_p = Vazão de pico; T_p = Tempo de pico; C_{superficial} = Coeficiente de escoamento superficial, e C_{global} = Coeficiente de escoamento global (Fonte: Autoria própria)

A Figura 29 ilustra o diagrama de dispersão do total precipitado *versus* a vazão máxima. No geral, nota-se que às maiores alturas de precipitação correspondem as maiores vazões, indicando uma relação positiva entre as duas variáveis. Entretanto, a precipitação em si não pode ser considerada como a única variável responsável pelas respectivas vazões. Outras variáveis, como, por exemplo, a evapotranspiração, a variação espacial das características geomorfológicas, o uso do solo, tipo de solo, cobertura vegetal são outras variantes que pode de certa forma, influenciar na transformação da precipitação em vazão.

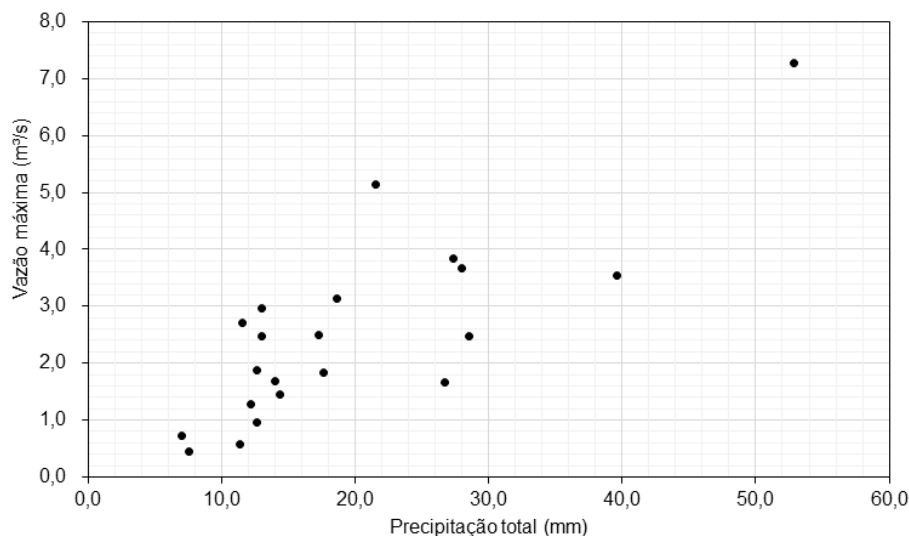


Figura 29 - Diagrama de dispersão dos eventos

Fonte: Autoria própria

Analisando a Figura 30, percebeu-se que em média 15,67% do volume precipitado foi convertido em escoamento superficial, ou seja, grande parte da água que caiu sobre a bacia hidrográfica foi infiltrado no solo. Apesar da bacia hidrográfica ser considerada como bacia urbana, a mesma apresentou segundo a Tabela 13 cerca de 45,79% de áreas de solos exposto e cobertura vegetal. Por tais motivos e a incerteza na definição da condição de umidade antecedente do solo, acredita-se na razão que motivou às elevadas taxas de infiltração.

Observa-se que os eventos datados de 25/09/1979 e 12/12/1979 mesmo apresentando os maiores volumes precipitado, ambos, tiveram menores volumes escoados, do que como por exemplo, o evento do dia 17/08/1980. No caso do evento 12/12/1979, como o T_r foi pouco maior do que os demais eventos, implica em uma maior lâmina de precipitação excedente, o que aumenta o volume escoado superficialmente e consequentemente a vazão de pico. Por outro lado, o evento 17/08/1980 apresentou o maior valor de coeficiente de escoamento superficial (Tabela 16), cerca de 27%.

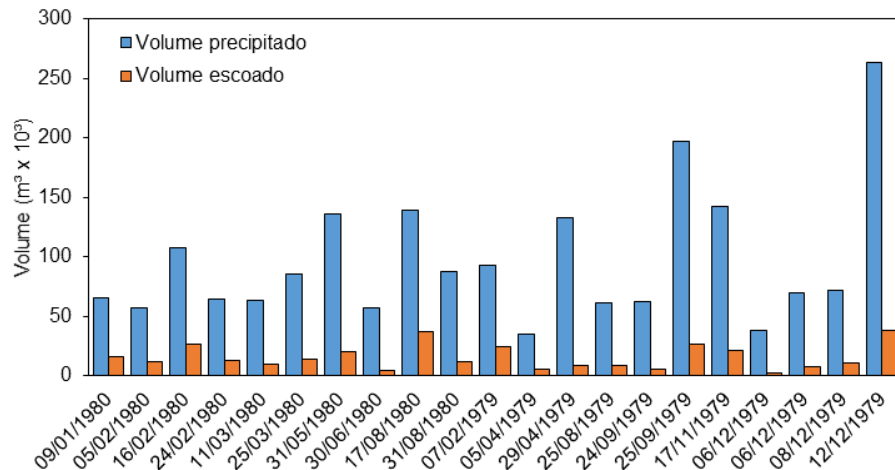


Figura 30 - Volume precipitado e escoado superficialmente sobre o Arroio Cascata I

Fonte: Autoria própria

4.2. Tempo de percurso do escoamento superficial

Tempo de concentração seria o tempo gasto em que a água gasta desde o ponto mais extremo da bacia hidrográfica até seu exutório da bacia hidrográfica (McCuen et al., 1984). Contudo, segundo Silveira (2005) há outros meios e menos rigorosos de obtenção desse tempo, como por exemplo, segundo o autor, a sua obtenção através de análise gráfica dos eventos observados de precipitação e de vazão, identificando o tempo gasto entre o último bloco da precipitação excedente e o fim do escoamento superficial.

Diferentemente, o tempo de concentração para a abordagem distribuída usada nesta pesquisa é o tempo gasto pelo escoamento ao percorrer cada pixel ao exutório da bacia hidrográfica real, aqui, denominado de tempo de deslocamento. Este por sua vez, é função da declividade e do coeficiente de MANNING atribuído ao pixel. Sendo os mapas dos tempos de deslocamento total (Figuras 34 e 35), obtidos a partir do somatório dos mapas dos tempos de deslocamento pela superfície (Figura 31) e pelos canais (Figura 32). E, os mapas das Figuras 31 e 32 obtidos a partir da aplicação das equações 20 (Figura 31) e 24 (Figura 32) em cada um dos pixels, separadamente.

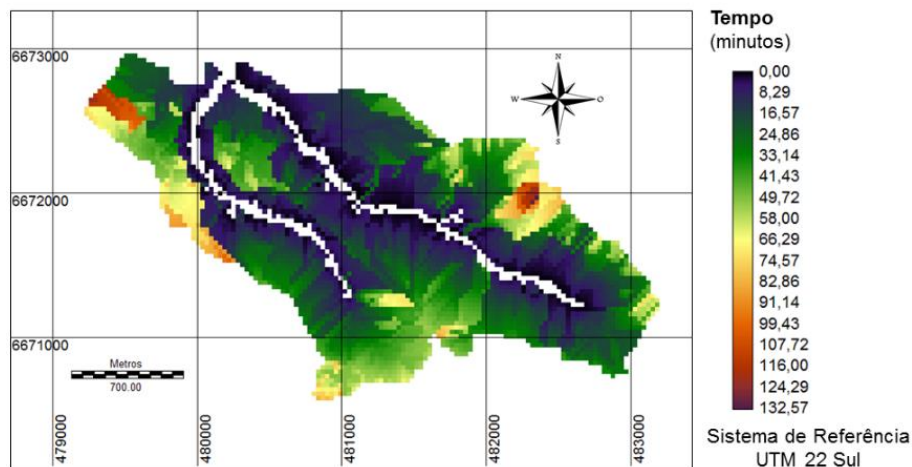


Figura 31 - Mapa do tempo de deslocamento pelas superfícies de cada pixel em relação ao exutório

Fonte: Autoria própria

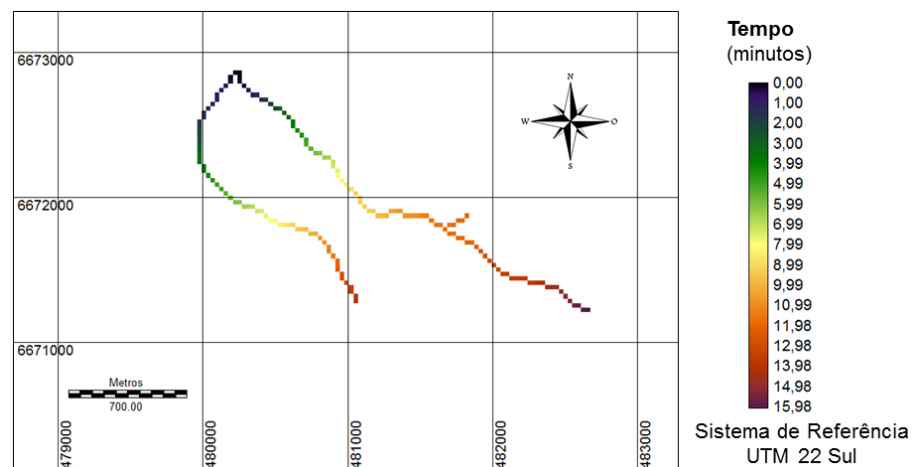


Figura 32 - Mapa do tempo de deslocamento pelos canais desde cada pixel ao exutório

Fonte: Autoria própria

A Figura 33 apresenta as distâncias dos trechos em canais desde cada pixel ao exutório da bacia hidrográfica. Nota-se que a bacia hidrográfica tem cerca de 3350,13 metros ($\cong 3,35$ km) de talvegue principal (curso d'água principal), apresentando mais tempos de percurso da água nos pixels a montante do exutório da bacia hidrográfica, mais especificamente nos extremos da rede de drenagem (Figura 32).

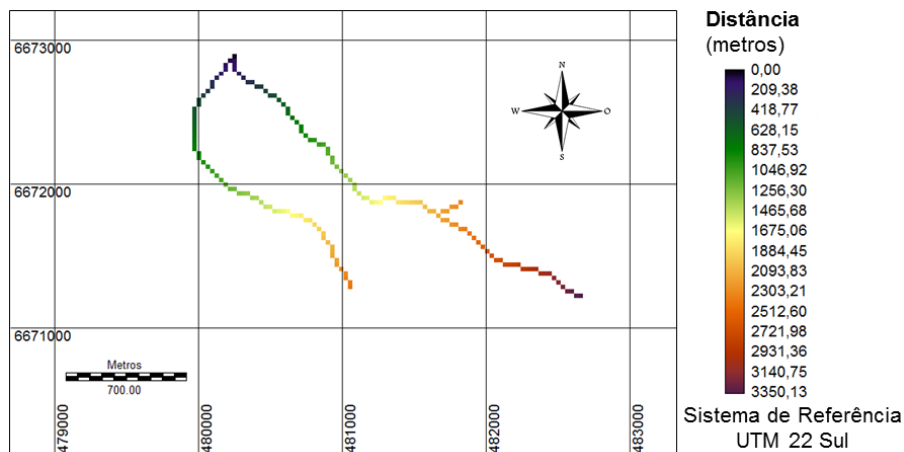


Figura 33 - Mapa dos comprimentos dos cursos dos rios desde cada pixel ao exutório

Fonte: Autoria própria

Pode-se observar dos mapas apresentados nas Figuras 34 e 35, a diferença dos tempos de deslocamento pela tonalidade das cores, proporcionando maiores tempos nas regiões em que apresentam tons amarelos a alaranjados. O tempo máximo para que toda a bacia hidrográfica contribuía com escoamento no exutório da bacia hidrográfica é de cerca de 227,64 minutos ou algo em torno de 3,79 horas.

Ainda se observa das Figuras 34 e 35 que os maiores valores de tempo de deslocamento do escoamento nos pixels em relação ao exutório da bacia hidrográfica estão concentrados no extremo sudoeste, região caracterizada por apresentar focos de vegetação, consequentemente gerando maior atrito para a água que esco superficialmente nesses pixels. Além disso, é uma região que mesmo estando próximo do exutório da bacia hidrográfica, apresenta baixas declividades, conforme destacado no mapa da Figura 36, favorecendo ainda mais o retardamento do escoamento.

Dos eventos analisados apenas o evento datado de 12/12/1979 apresentou valor de período de retorno acima de 2 anos (3,31 anos), apresentando valores no tempo de deslocamento do escoamento nos pixels, pouco menores, quando comparado com os demais eventos. Para os demais eventos foram considerados período de retorno de 2 anos, como foi explicado no tópico 3.6.1 da metodologia.

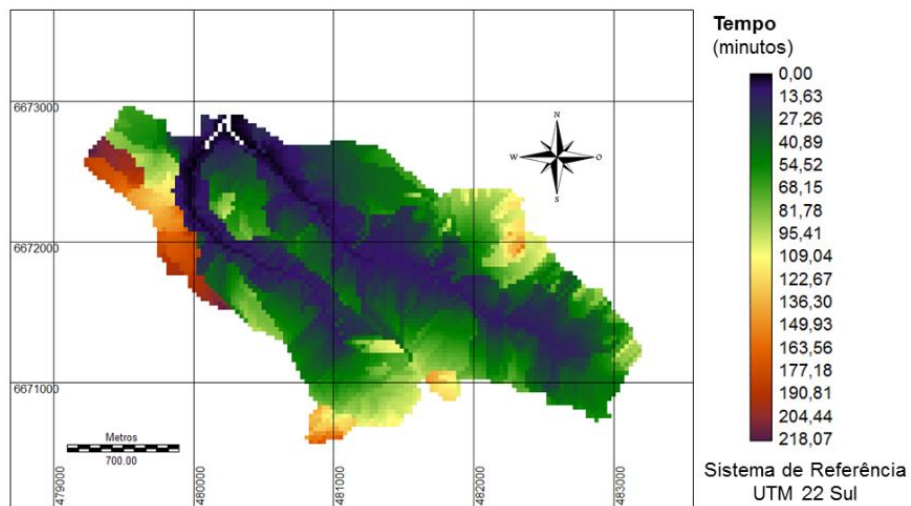


Figura 34 - Tempo de deslocamento total de cada pixel ao exutório estimado para o evento datado de 12/12/1979

Fonte: Autoria própria

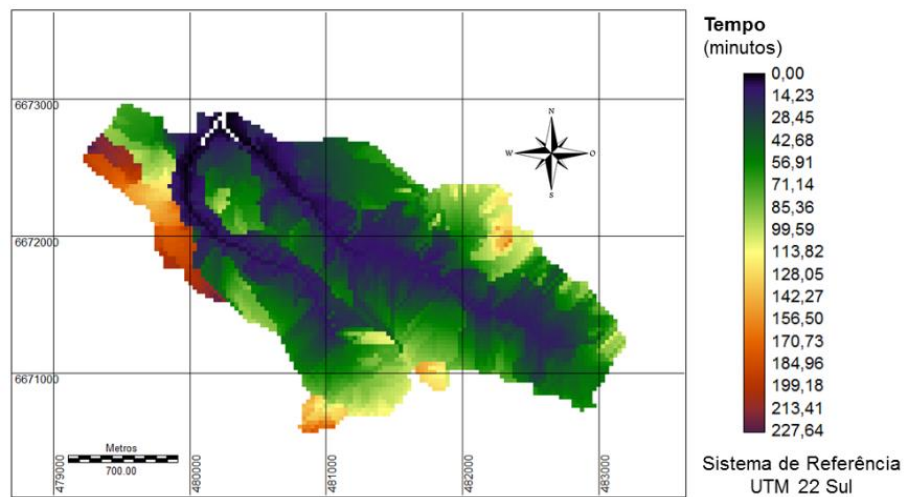


Figura 35 - Tempo de deslocamento total de cada pixel ao exutório para os demais eventos

Fonte: Autoria própria

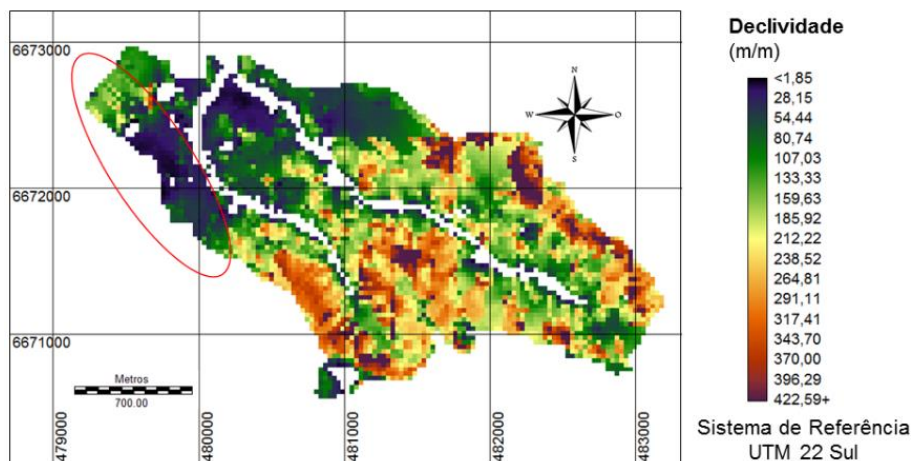


Figura 36 - Mapa de declividade da superfície de cada pixel

Fonte: Autoria própria

4.3. Precipitação excedente

A aplicação das equações do modelo do NRCS-CN pela abordagem tradicional resultou nos valores de CN médio, armazenamento máximo (S) e de perdas iniciais descritos na Tabela 17. Porém, quando aplicada em cada pixel (abordagem distribuída), teve-se como resultados os mapas de armazenamento máximo (Figura 37) e de perdas iniciais (Figura 38), em que para cada pixel tem-se os valores de S e de perdas iniciais.

O mapa apresentado na Figura 37 foi igual para todos os eventos durante a calibração do modelo distribuído. Isso porque esse parâmetro é função apenas do parâmetro CN, e como bem mencionado na metodologia foi considerado neste estudo a condição II de umidade antecedente do solo para todos os eventos, ou seja, independente do evento, o mapa de CN (Figura 23) é o mesmo. Por outro lado, para obtenção do mapa da Figura 38 foi considerado 20% de abstrações iniciais.

Os pixels ocupados por áreas urbanas são responsáveis pela maior parte do escoamento superficial gerado na bacia hidrográfica, tendo em vista que apresentam capacidades de armazenamento de água (infiltração no solo e subsolo) quase que nulas. Diferentemente, das áreas dos pixels ocupadas pela vegetação, uma vez que essas áreas são caracterizadas por apresentarem maior capacidade de armazenamento de água, logo, menor é a geração de escoamento superficial.

Os pixels em branco que estão dentro do limite da bacia hidrográfica em questão, a abordagem distribuída não contabilizou armazenamento e nem perdas iniciais, o que já era de se esperar, tendo em vista que esses pixels são representados por pequenos reservatórios de água, conforme apresentado no mapa de uso do solo (Figura 19).

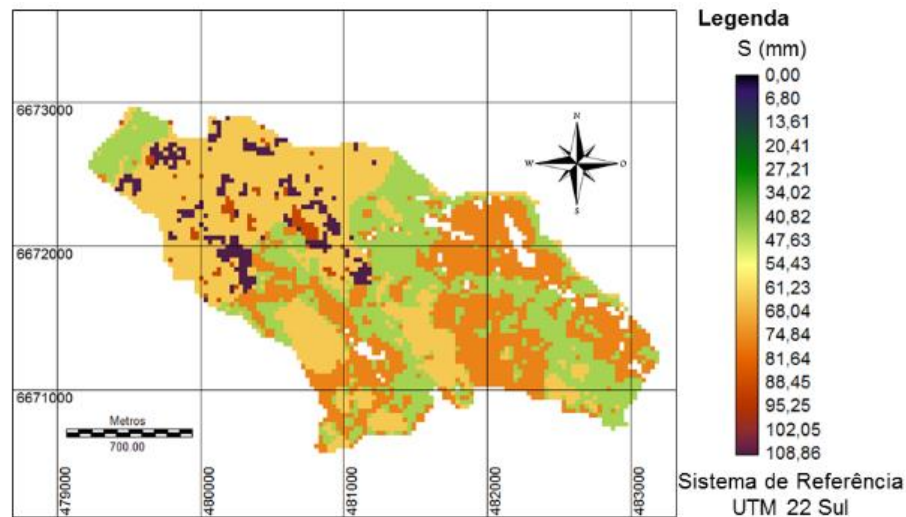


Figura 37 - Mapa de armazenamento máximo

Fonte: Autoria própria

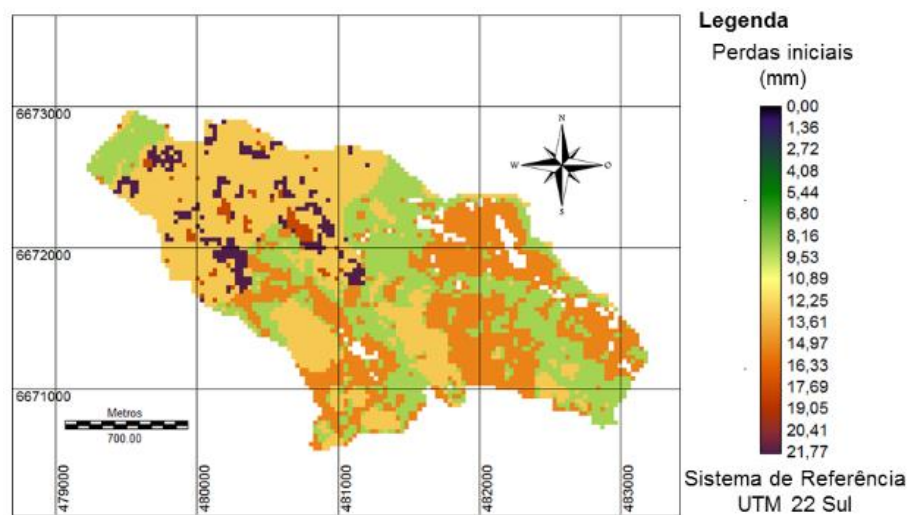


Figura 38 - Mapa de perdas iniciais antes da calibração

Fonte: Autoria própria

Tabela 17 - Resultados dos parâmetros do modelo NRCS-CN em sua abordagem tradicional

CN médio	S (mm)	Perdas iniciais (mm)
80,51	61,50	12,30

Fonte: Autoria própria

As Figuras de 39 a 41 apresentam os mapas de precipitação excedente acumulado total correspondentes a alguns eventos, antes e depois da calibração. Como se pode observar, nas regiões onde predominam áreas de solo exposto e urbana foram onde apresentaram as maiores concentrações de precipitação excedente, o que já era esperado. Ocorre o inverso nos pixels cuja as ações antrópicas são menores, visto que, são regiões que apresentam maior capacidade de armazenamento e consequentemente maiores perdas iniciais. Sendo o evento datado de 12/12/1979 o que apresentou as maiores lâminas de precipitação excedente. Contudo, esse evento foi o que se mostrou como sendo o de maior porte (Tabela 16), o que pode responder os elevados valores.

Antes da calibração (Figuras 39-a e 40-a) o modelo distribuído não contabilizou precipitação excedente nos pixels que apresentaram maiores valores de perdas iniciais (Figura 37). Entretanto, esses mapas em particular apresentam características de eventos de pequeno porte, conforme a Tabela 16, e atrelado à condição de umidade antecedente do solo considerada nesta pesquisa (Condição II - média), podem responder a tais resultados. Diferentemente, são os mapas pós-calibração (Figuras 39-b e 40-b) que mesmo sendo lâminas pequenas (algo em torno de 1,5 mm) geraram precipitação excedente nos pixels que antes não apresentavam (Figuras 39-a e 40-a).

Ressalta-se ainda dos mapas, que o grupo hidrológico do tipo D apresentou as maiores concentrações de escoamento superficial. Para Tucci (2005), esses solos apresentam argilas com características expansivas e pouco profundas, e com muito baixa capacidade de armazenamento de água (baixa infiltração), o que podem levar a maiores proporções de escoamento superficial.

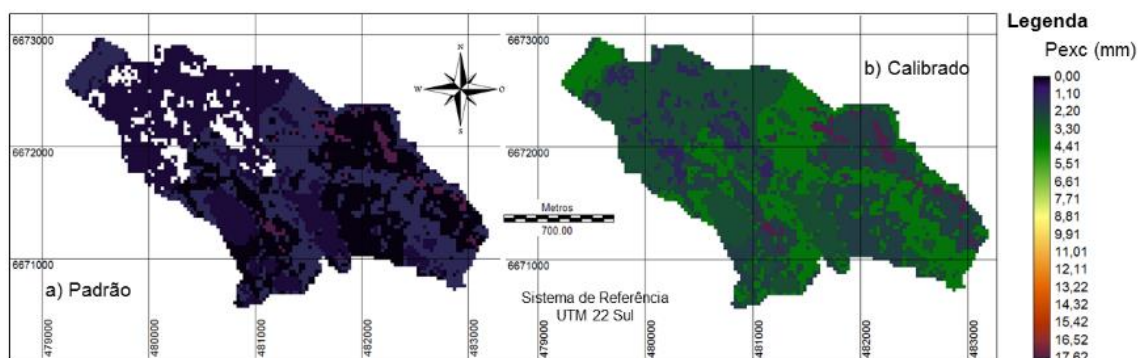


Figura 39 - Mapas de precipitação excedente acumulada total por pixel do evento datado de 31/08/1980
Fonte: Autoria própria

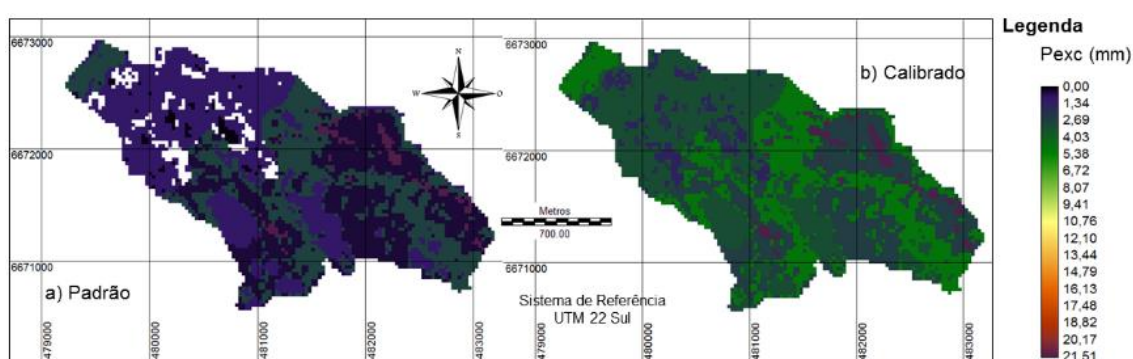


Figura 40 - Mapas de precipitação excedente acumulada total por pixel do evento datado de 16/02/1980
Fonte: Autoria própria

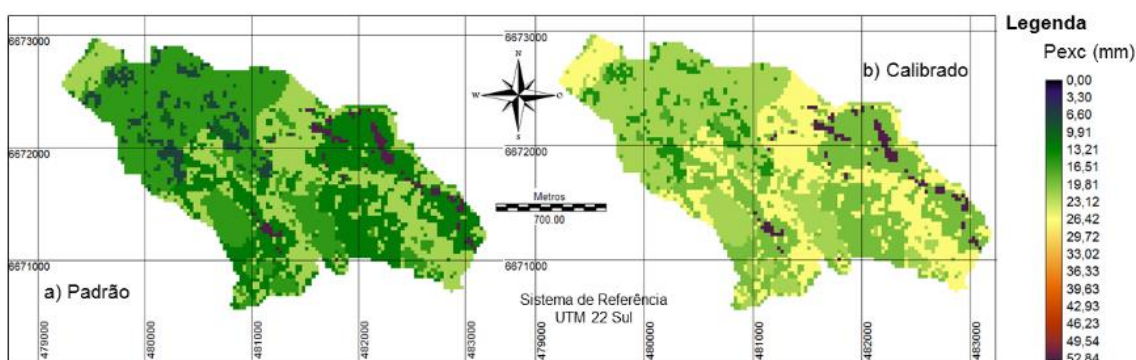


Figura 41 - Mapas de precipitação excedente acumulada total por pixel do evento datado de 12/12/1979
Fonte: Autoria própria

4.4. Análise de hidrogramas resultantes

Foi realizada uma série de simulações, com o propósito de se alcançar ao melhor par de parâmetros das perdas iniciais e do fator de tempo de pico, que melhor se representa os resultados da abordagem distribuída. A abordagem distribuída foi ajustada individualmente a cada evento utilizado para a calibração, permitindo que os parâmetros variassem de acordo com a busca das melhores estatísticas. Inicialmente foram simulados HUs resultantes considerando os valores dos parâmetros na forma original do modelo do NRCS-CN-HU (Tabelas 18 e 19), sendo posteriormente calibrados e obtidos os melhores resultados, conforme o melhor par de parâmetros (Tabelas 20 e 21).

Tabela 18 - Erros relativos da vazão de pico (Qp), tempo de pico (Tp) e volume escoado (V) para a simulação com o método NRCS-CN-HUexe, simulando com os valores padrão dos parâmetros

Evento	Perdas iniciais	Fator de tempo de pico	ΔQ_p (%)	ΔT_p (%)	ΔV (%)
31/08/1980	0,20	0,60	-38,00	-13,00	-59,00
16/02/1980			-81,00	41,00	-67,00
09/01/1980			-86,00	-18,00	-87,00
12/12/1979			180,00	-36,00	120,00
25/09/1979			59,00	-40,00	74,00
05/04/1979			-78,00	-38,00	-85,00
07/02/1979			-63,00	-29,00	-76,00

Fonte: Autoria própria

Tabela 19 - Erros relativos da vazão de pico (Qp), tempo de pico (Tp) e volume escoado (V) para a simulação com o método NRCS-CN-HUjus, simulando com os valores padrão dos parâmetros

Evento	Perdas iniciais	Fator de tempo de pico	ΔQ_p (%)	ΔT_p (%)	ΔV (%)
31/08/1980	0,20	0,60	-52,00	-9,00	-59,00
16/02/1980			-83,00	44,00	-67,00
09/01/1980			-88,00	-5,00	-87,00
12/12/1979			102,00	-17,00	115,00
25/09/1979			39,00	-24,00	69,00
05/04/1979			-78,00	-20,00	-85,00
07/02/1979			-69,00	-22,00	-77,00

Fonte: Autoria própria

Tabela 20 - Erros relativos da vazão de pico (Q_p), tempo de pico (T_p) e volume escoado (V) para a simulação com o método NRCS-CN-HU_{exe}, simulando com os valores calibrados dos parâmetros

Evento	Perdas iniciais	Fator de tempo de pico	ΔQ_p (%)	ΔT_p (%)	ΔV (%)
31/08/1980	0,15	0,55	1,00	-13,00	-36,00
16/02/1980	0,03	0,35	-1,00	-38,00	-4,00
09/01/1980	0,20	0,10	0,00	-25,00	-68,00
12/12/1979	0,50	0,65	0,00	-32,00	-4,00
25/09/1979	0,30	0,60	1,00	-29,00	21,00
05/04/1979	0,01	0,90	0,00	-41,00	-34,00
07/02/1979	0,05	0,70	0,00	-38,00	-28,00
	0,09	0,45	0,00	-40,00	-44,00

Fonte: Autoria própria

Tabela 21 - Erros relativos da vazão de pico (Q_p), tempo de pico (T_p) e volume escoado (V) para a simulação com o método NRCS-CN-HU_{jus}, simulando com os valores calibrados dos parâmetros

Evento	Perdas iniciais	Fator de tempo de pico	ΔQ_p (%)	ΔT_p (%)	ΔV (%)
31/08/1980	0,10	0,15	1,00	-10,00	-15,00
16/02/1980	0,01	0,45	-37,00	-11,00	4,00
09/01/1980	0,01	0,45	-29,00	-20,00	-28,00
12/12/1979	0,45	0,25	1,00	-13,00	21,00
25/09/1979	0,25	0,10	0,00	-24,00	25,00
05/04/1979	0,01	0,40	-1,00	-37,00	-35,00
07/02/1979	0,02	0,15	0,00	-27,00	-23,00

Fonte: Autoria própria

Nota-se da Figura 42 (figura da esquerda) que, para um determinado evento e para um determinado valor de perdas iniciais, à medida que o tempo de pico se aproxima da linha 1:1, os valores de Q_p para HU_{exe} e HU_{jus} são praticamente iguais. Sendo, portanto, indiferente o resultado se empregado o fator de tempo de pico igual a 1, ou seja, $T_p = T_d$ para cada pixel. Por outro lado, a medida que o fator de tempo de pico diminui (T_p menor em relação a T_d), HU_{exe} e HU_{jus} apresentam resultados cada vez mais diferentes, entre si. É justamente esse resultado que ocasionam maiores (superestimação) vazões de pico quando empregado o hidrograma distribuído HU_{exe} (figura da direita). Contudo, após a calibração as vazões de pico foram reduzidas de forma considerável, chegando a estimar valores exatos de Q_p (Tabelas 20 e 21) de alguns eventos utilizados na calibração e que podem ser melhor visualizados nas Figuras 43 e 44.

Uma outra análise que se pode tirar da Figura 42 é que, o hidrograma distribuído HU_{Jus} se mostrou pouco sensível ao fator de tempo de pico, isso porque, resultados obtidos pelo HU_{Jus} variaram muito pouco as vazões de pico, ao variar o fator T_p , diferentemente do HU_{exe}.

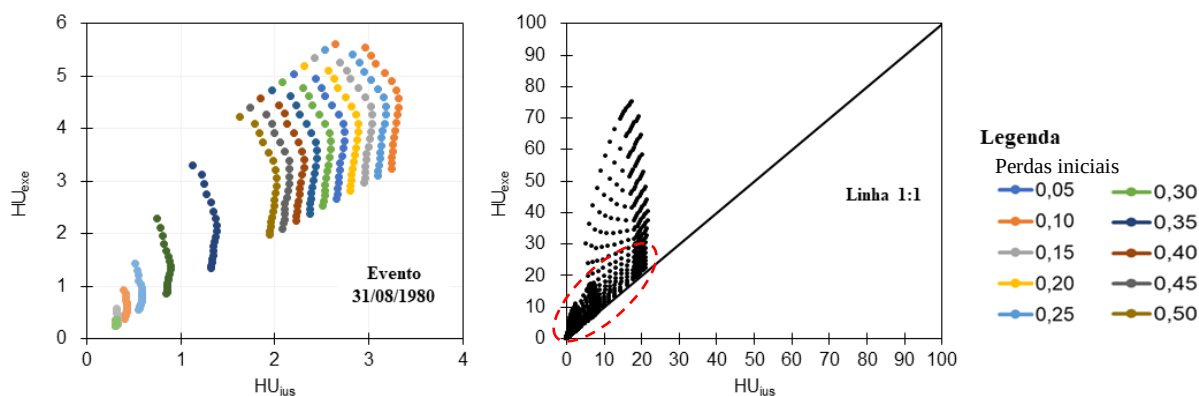


Figura 42 - Comparação das vazões de pico simuladas pelos os tipos de HU distribuídos
Fonte: Autoria própria

Uma outra razão da superestimação das vazões de pico, pode estar relacionada pelo o fato do Arroio Cascata I ser caracterizada como sendo uma bacia hidrográfica urbana, que segundo Vendrame e Lopes (2005), essas bacias hidrográficas apresentam características em comum de superestimar e antecipar a vazão de pico nos hidrogramas. Além disso, as superestimações das vazões estão associadas ao fato de que os HUs gerados pelos pixels apresentam, em muitos casos, pequenos tempos de base e de pico, como resultado de um pequeno tempo de deslocamento do escoamento superficial, que conseqüentemente, acabam por estimar maiores vazões de pico.

Um outro aspecto importante que deve ser mencionado, diz respeito aos valores de CNs empregados neste estudo, isso porque Cunha et al. (2015) comentam a superestimação das vazões de pico a partir de CNs obtidos pelas tabelas do NRCS. Os autores ainda sugerem que este parâmetro seja associado a própria precipitação efetiva que cai sobre a bacia hidrográfica. Silveira (2010) ainda relata que quanto maior o valor deste parâmetro (CN), mais impermeável se torna a bacia hidrográfica, conseqüentemente, menor será a sua capacidade de armazenamento da água no solo.

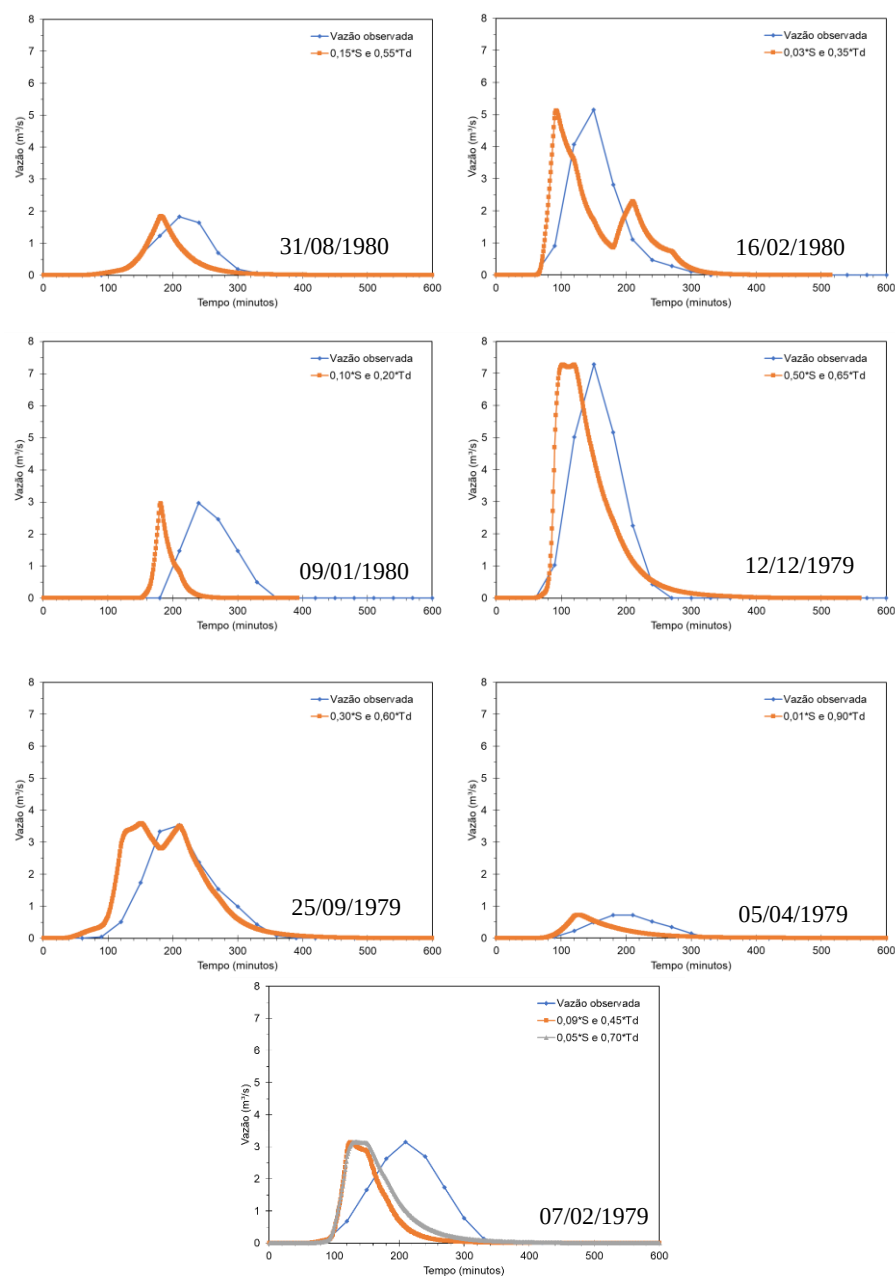


Figura 43 - Comparação entre hidrogramas observados e simulados utilizando abordagem NRCS-CN-HUexe

Fonte: Autoria própria

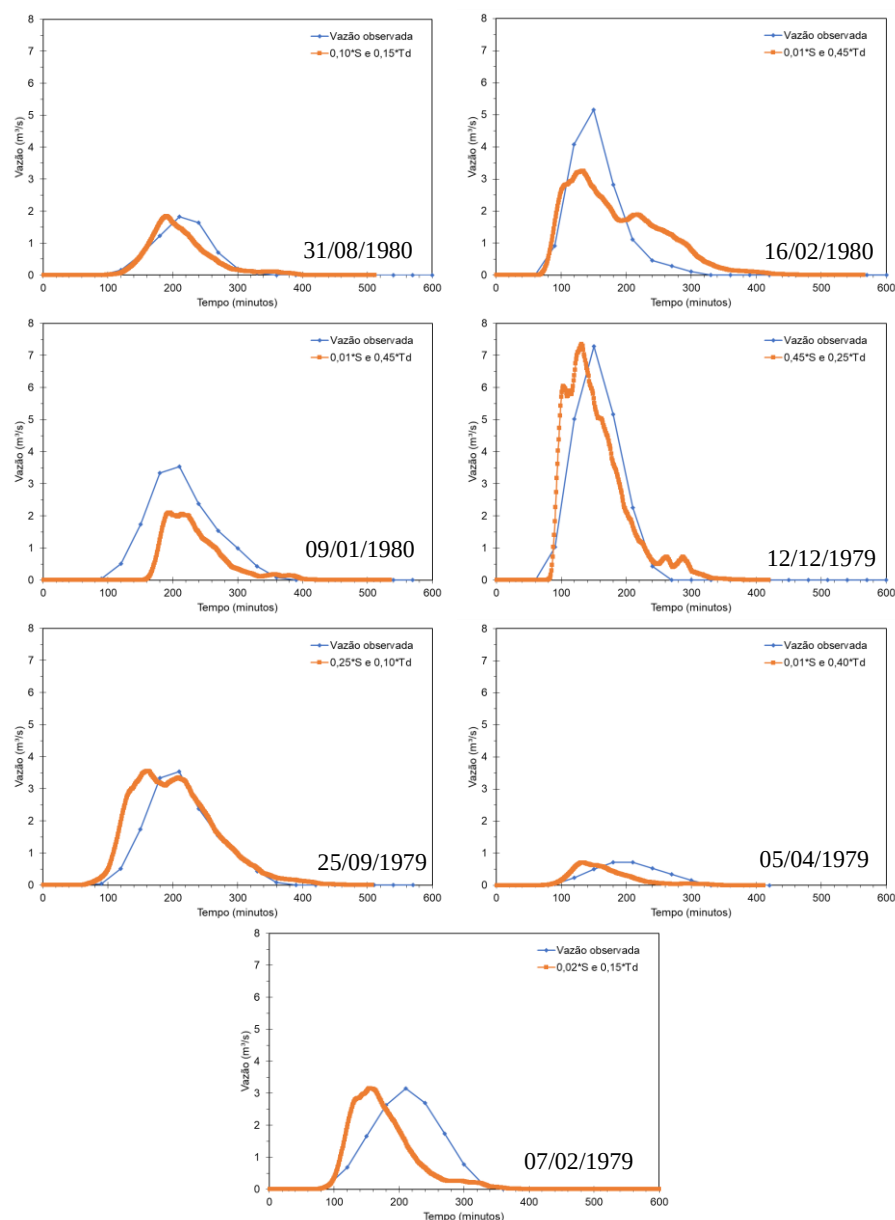


Figura 44 - Comparação entre hidrogramas observados e simulados utilizando abordagem NRCS-CN-HUjux

Fonte: Autoria própria

Observa-se das figuras anteriores (Figuras 43 e 44) que, para alguns eventos os métodos de hidrogramas distribuídos (HU_{exe} e HU_{jux}) se mostraram sensível a distribuição da precipitação, isso porque, nota-se em alguns eventos uma certa discrepância quanto à forma do hidrograma, como foi o caso do evento datado de 16/02/1980. Vale salientar que, a distribuição espacial uniforme da precipitação é uma das limitações a qual está sujeito o modelo NRCS-HU.

Uma outra possível causa por tais discrepâncias podem ter sido em virtude da própria resolução espacial da imagem. Isso porque, estudos que compararam hidrogramas obtidos a partir de dados observados com hidrogramas obtidos por modelos hidrológicos distribuídos para diferentes combinações de resoluções espaciais, avaliando o impacto da variabilidade espacial das precipitações na geração do escoamento superficial, descrevendo principalmente eventos de inundação, e que geralmente consistia em uma comparação de vazão de pico, apresentaram resultados contrastados (Emmanuel et al., 2015). Sendo, portanto, a distribuição da precipitação e a resolução espacial da imagem é algo a ser melhor trabalhado.

As Figuras 45 e 47 apresentam as porcentagens dos erros relativos dos tempos de pico. Nota-se que, quando aplicado o hidrograma distribuído do tipo HU_{exe} grande parte dos valores de perdas iniciais levam a erros de T_p para algo em torno de -40%, com exceção do evento do dia 31/08/1980 que apresentou erros de T_p entre 0 e 10%. Por outro lado, quando analisamos o segundo tipo de hidrograma distribuído (HU_{jus}), observa-se uma redução significativa dos erros, apresentando em média melhores resultados quando empregado valores de perdas iniciais maiores do que o modelo do NRCS-CN em sua abordagem tradicional.

Quando se analisa as porcentagens dos erros relativos das vazões de pico ilustradas nas Figuras 46 e 48, observa-se que, quanto menores as perdas, menores são os erros de Q_p , apresentando em média o melhor resultado quando aplicado 5% de perdas iniciais. Percebeu-se ainda que, para um mesmo valor de perdas iniciais a variação do fator de tempo de pico muda muito pouco o erro de Q_p , pelo menos para as perdas iniciais mais altas. O efeito do fator de tempo de pico passa a ser considerável para as perdas iniciais menores, como 5%.

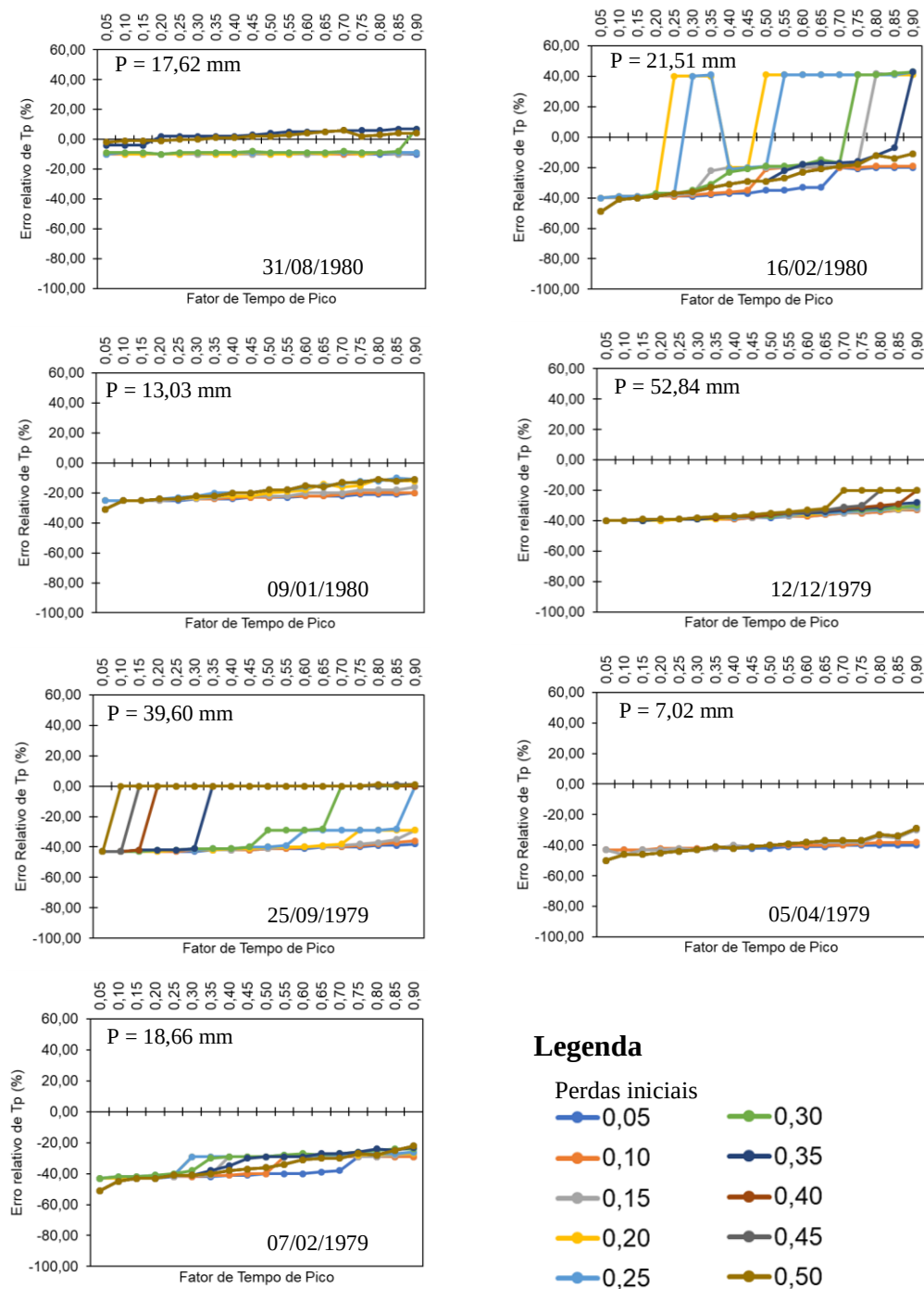


Figura 45 - Erros relativos do tempo de pico (Tp) utilizando o método NRCS-CN-HUexe para os sete eventos da calibração em função da variação dos parâmetros perdas iniciais (percentual de S) e fator de tempo de pico

Fonte: Autoria própria

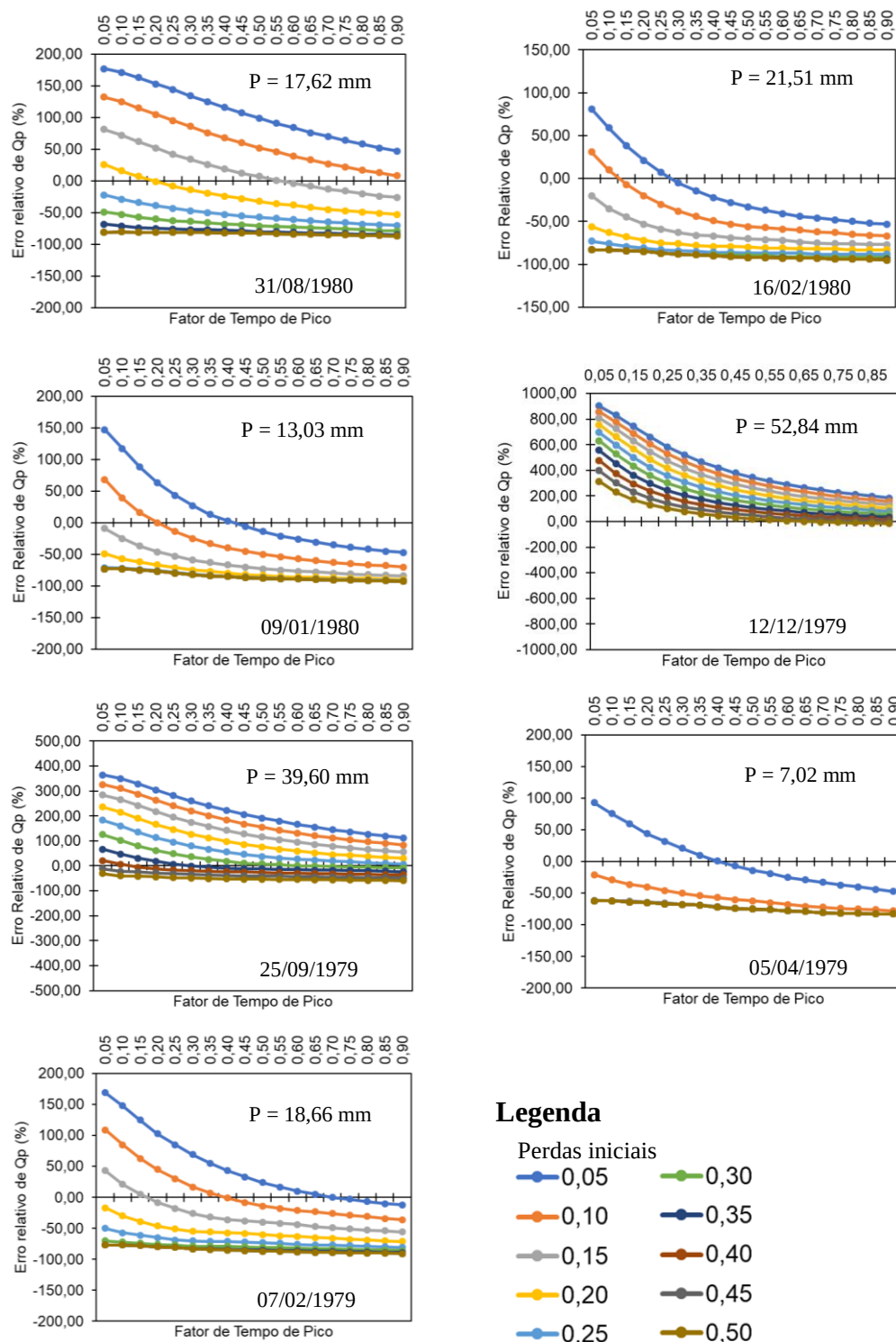
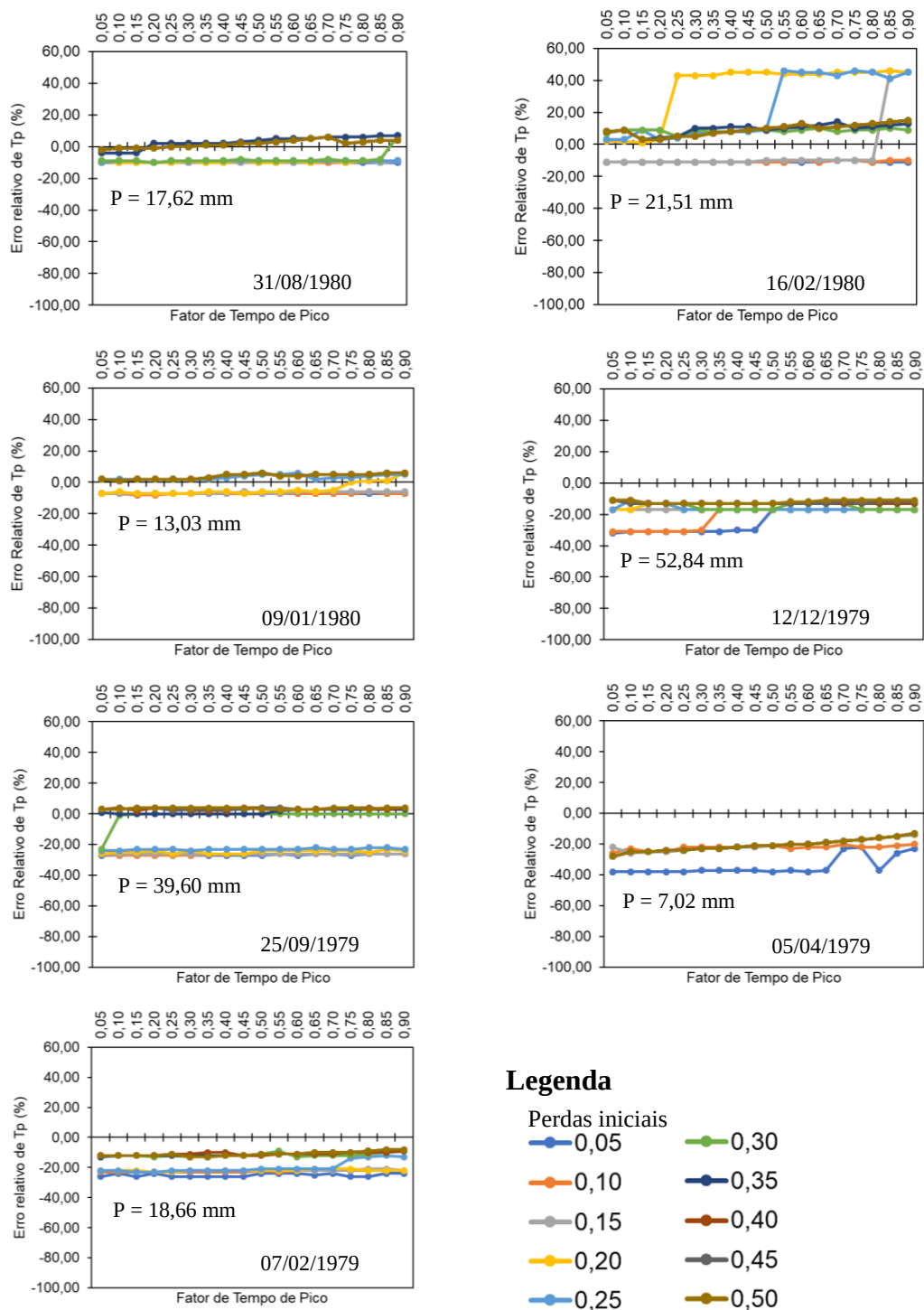


Figura 46 - Erros relativos da vazão de pico (Qp) utilizando o método NRCS-CN-HUexe para os sete eventos da calibração em função da variação dos parâmetros perdas iniciais (percentual de S) e fator de tempo de pico
Fonte: Autoria própria



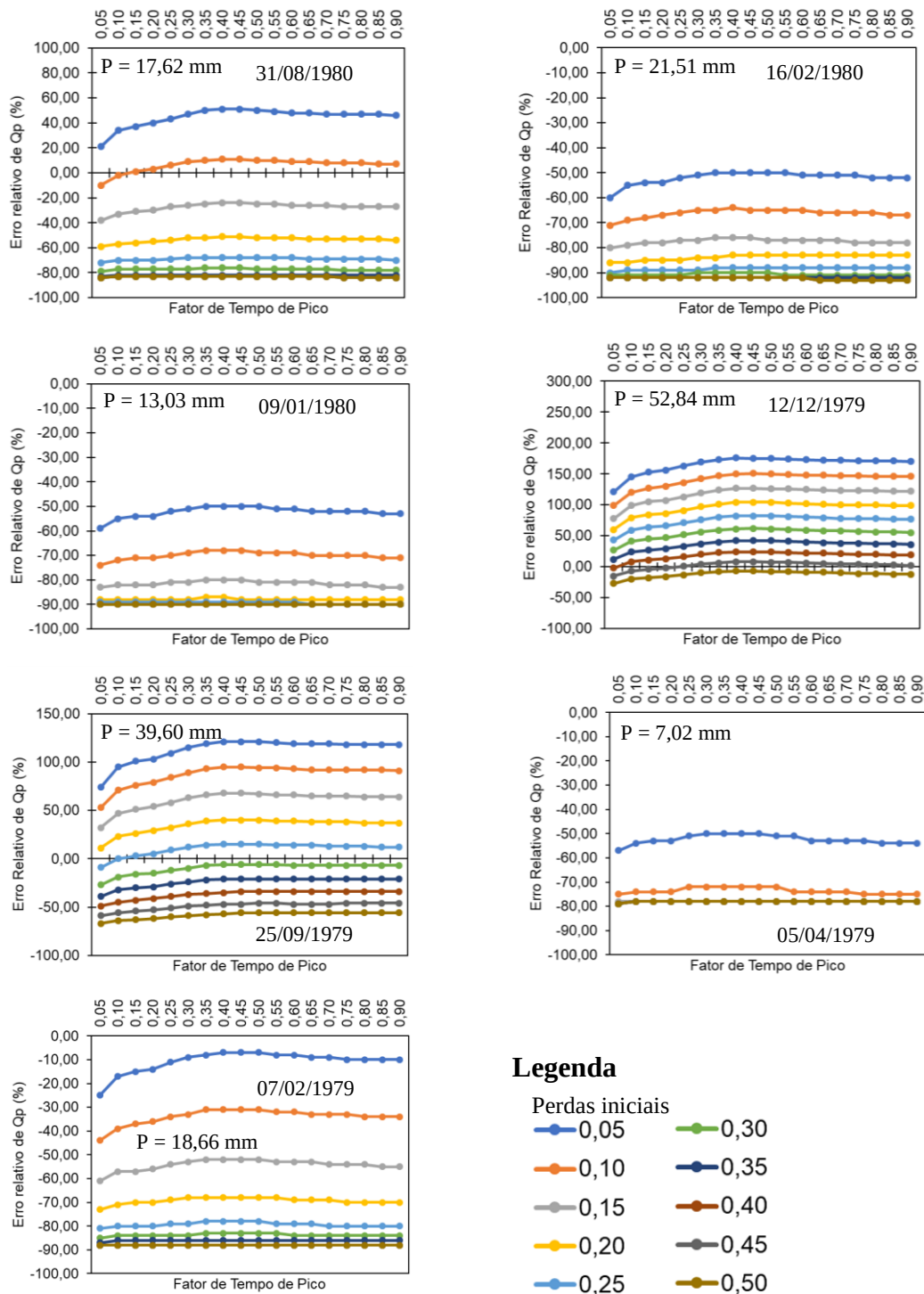


Figura 48 - Erros relativos da vazão de pico (Q_p) utilizando o método NRCS-CN-HUJus para os sete eventos da calibração em função da variação dos parâmetros perdas iniciais (percentual de S) e fator de tempo de pico

Fonte: Autoria própria

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

Para o problema de estimativas do escoamento superficial em bacias hidrográficas, percebe-se uma evolução das metodologias aplicadas, partindo desde os métodos tradicionais, passando pelos modelos mais simples, que não levam em conta a variabilidade espacial até modelos mais complexos, que consideram a heterogeneidade da bacia hidrográfica. A incorporação da variabilidade espacial, atualmente, vem sendo adotadas alternativas de incorporação da variabilidade espacial dos parâmetros descritivos da geologia, de uso e ocupação do solo, topografia, e da precipitação, no entanto, a heterogeneidade da natureza não vem sendo considerada da forma que o presente estudo a trabalhou.

Com base no que foi exposto nos resultados, é possível afirmar que a abordagem distribuída apresenta características de: (i) tendência de superestimar as vazões de pico; (ii) tendência de subestimar os tempos de pico e (iii) a precipitação tende a começar a gerar escoamento superficial no exutório da bacia hidrográfica em um menor período de tempo, consequentemente, subestimando o tempo de pico.

As características (i) e (ii) estão associadas ao fato de que os HUs gerados pelos pixels apresentam, em muitos casos, pequenos tempos de base e de pico, como resultado de um pequeno tempo de concentração, que consequentemente, acabam por estimar maiores vazões de pico. Além disso, as maiores vazões de pico podem estar relacionadas à variabilidade espacial do CN.

A característica (iii) está também relacionada à variabilidade espacial do CN. Já que pixels com CN mais elevado acabam gerando escoamento em menor tempo.

Apesar de o modelo distribuído ser aplicável da mesma forma a qualquer resolução espacial, é possível que esta possa influenciar consideravelmente os resultados obtidos. Tendo em vista que, foram utilizadas imagens com resolução de aproximadamente 30 m, que podem ser consideradas não tão detalhadas para a bacia hidrográfica estudada, que apresenta uma área de apenas 4,98 km².

Diante das limitações e potencialidades da abordagem distribuída apresentadas, percebeu-se que tal metodologia, que leva em conta algumas características da bacia hidrográfica, como por exemplo, o uso do solo e a cobertura vegetal, demonstra potencial para prever vazões em eventos unitários em bacias hidrográficas com poucos dados ou até mesmo sem dados observados. Apresentando em média seu melhor resultado quando aplicado o hidrograma distribuído HU_{jus} , em conjunto com as combinações de 0,05 para as perdas iniciais e 0,45 para o fator de tempo ao pico. Muito embora, de uma maneira geral, os resultados obtidos pelos dois tipos de hidrogramas empregados no estudo, mostraram-se que ambos recomendam um bom número de resultados aceitos.

5.2. Recomendações

Através dessa abordagem na qual foi proposta, pode-se realizar análises em regiões específicas da bacia hidrográfica, como por exemplo, identificar pontos onde poderia por ventura, ocasionar maiores problemas a população, como são os casos de áreas susceptíveis a inundação, problema este, comum nos grandes centros urbanos brasileiros. No entanto, assim como qualquer modelo hidrológico é importante ressaltar as limitações a que está sujeito a abordagem distribuída, e nessa perspectiva sugeri para trabalhos futuros as seguintes recomendações:

- Estimar o parâmetro P24 a partir do coeficiente de escoamento;
- Calibrar o MANNING das superfícies;
- Identificar as condições de umidade antecedente do solo para melhor estimar os valores de CNs;
- Analisar a hipótese de se considerar a variabilidade espacial das precipitações;
- Avaliar os resultados do modelo distribuído para outras resoluções de imagens e
- Aplicar o modelo distribuído para mais eventos observados de precipitação e de vazão e em outras bacias hidrográficas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGIRRE, M.; GONI, M.; LÓPEZ, J. J.; GIMENA, F. N. (2005). Application of a Unit Hydrograph Based on Subwatershed Division and Comparison with Nash's Instantaneous Unit Hydrograph. **Catena**, v. 64, p. 321-332. DOI: 10.1016/j.catena.2005.08.013.
- AJMAL, M.; KIM, T. W. (2015). Quantifying Excess Stormwater using SCS-CN-Based Rainfall Runoff Models and Different Curve Number Determination Methods. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 141. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000805.
- AJMAL, M.; WASEEM, M.; AHN, J. H.; KIM, T. W. (2015). Improved Runoff Estimation Using Event-Based Rainfall-Runoff Models. **Water Resources Management**, v. 29, p. 1995-2010. DOI: 10.1007/s11269-015-0924-z.
- ALMEIDA, I. K.; ANACHE, J. A. A.; ALMEIDA, V. R.; SOBRINHO, T. A. (2013). Estimativa de tempo de concentração em bacia hidrográfica. **In Anais XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves, RS, Novembro.
- ALVES, C. A. (2004). Estimativa da área impermeável dentro da bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio (Porto Alegre/RS) através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. 137p. **Dissertação** (Mestrado em Sensoriamento Remoto), UFRGS, Porto Alegre, RS.
- ANDRADE, A. C. S. (2007). Determinação de hidrograma unitário instantâneo geomorfológico - bacia do ribeirão salobra. 135p. **Dissertação** (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), UFMTS, Campo Grande, MT.

- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; MUTTIAH, R.; BERNHARDT, G. (1995). Automated base flow separation and recession analysis techniques. **Ground Water**, v. 33, n. 6. November/December
- BANACH, W. (2011). Determination of Synthetic Flood Hydrograph in Ungauged Catchments. Polska akademia nauk. **OddziaL w Krakowie**, n. 12, p. 147–156.
- BARBOSA, A. M.; FILL, H. D. (2001). Modelo de Previsão de Vazão Baseado no Hidrograma Unitário. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 4, p. 165-174, out./dez. DOI: 10.21168/rbrh.v6n4,p165-174
- BHUNYA, P. K.; PANDA, S. N.; GOEL, M. K. (2011). Synthtic Unit Hydrograph Methods: A Critical Review. **The Open Hydrology Journal**, v. 5, p. 1-8.
- BOUGHTON, W. C. (1993). A hydrograph-based model for estimating the water yield of ungauged catchments. **Hydrology and Water Resources Symposium**, Newcastle, June 30 – July 2. Preprints of Papers, Inst. Engs., Aust., Nat. Conf., p. 317-324.
- CAMPANA, N. A.; MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. (1995). A multi-source approach to hydrologic parameter estimation in urban basins. **Wat. Sci. Tech.**, v. 32, n.1, p. 233-239.
- CAMPANA, N. A.; TUCCI, C. E. M. (1999). Previsão da vazão em macrobacias urbanas: Arroio Dilúvio em Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, n.1, p. 19-33, jan./mar.
- CAMPANA, N.; MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. (1995). A multi-source approach to hydrologic estimation in urban basins. In: **Water Science and Technology**, v. 32, n. 1, p. 233-240. DOI: [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00560-A](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00560-A)

- CANHOLI, A. P. (2005). Drenagem urbana e controle de enchentes. São Paulo: **Oficina de texto**, 384p.
- CARVALHO, M. A.; CHAUDRHY, F. H. (2001). Aplicação de Hidrograma Unitário Geomorfológico na Previsão de Respostas Hidrológicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 4, p. 5-17, out./dez.
- CHAPMAN, T. G.; MAXWELL, A. I. (1996). Baseflow separation – Comparison of numerical methods with tracer experiments. **Hydrological and Water Resources Symposium**, Institution of Engineers Australia, Hobart, p. 539–545.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. (2013). Hidrologia: Para Engenharia e Ciências Ambientais. Porto Alegre: **Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, 336p. (Coleção ABRH; 12).
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. (2012). Defining parameters for Eckhart’s digital baseflow filter. **Hydrological Processes**. DOI:10.1002/hyp.9391.
- CUNHA, S. F.; SILVA, F. E. O.; MOTA, T. U.; PINHEIRO, M. C. (2015). Avaliação da Acurácia dos Métodos dos SCS para Cálculo da Precipitação Efetiva e Hidrogramas de Cheia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n.4, p. 837-848, out/dez. DOI: 10.21168/rbrh.v20n4.p837-848
- CHRISTIANSON, R. D.; HUTCHINSON, S. L.; BROWN, G. O. (2016). Curve Number Estimation Accuracy on Disturbed and Undisturbed Soils. **J. Hydrol. Eng.**, v. 21, n. 2. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001274

- D'ASARO, F. D.; GRILLONE, G.; HAWKINS, R. H.; ASCE, F. (2014). Curve Number: Empirical Evaluation and Comparison with Curve Number Handbook Tables in Sicily. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 12.
- DAWOD, G. M.; KOSHAK, N. A. (2011). Developing GIS-Based Unit Hydrographs for Flood Management in Makkah Metropolitan Area, Saudi Arabia. **Journal of Geographic Information System**, v. 3, n. 2, p. 160-165. DOI:10.4236/jgis.2011.32012.
- DEP - DEPARTAMENTO DE ESGOTOS PLUVIAIS (DEP, 2005). Plano diretor de drenagem urbana: **Manual de drenagem urbana**. 1 CD-RDW.
- DEP - DEPARTAMENTO DE ESGOTOS PLUVIAIS (DEP, 2014). **Elaboração do plano diretor de drenagem urbana (3ª etapa) e atualização e complementação cadastral, no município de Porto Alegre**. 1 CD-RDW.
- DPI - DIVISÃO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS. Variáveis ambientais para modelagem de distribuição de espécies (AMBDATA). Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/mapa_solos.php>. Acessado em: 15/10/2016.
- DU, J.; XIE, H.; HU, Y.; XU, Y.; XU, C. Y. (2009). Development and testing of a new storm runoff routing approach based on time variant spatially distributed travel time method. **Journal of Hydrology**, v. 369, n. 1-2, p. 44–54.
- DURÁN-BARROSO, P.; GONZÁLEZ, J.; VALDÉS, J. B. (2016). Improvement of the integration of Soil Moisture Accounting into the NRCS-CN model. **Journal of Hydrology**, xxx, xxx–xxx. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.053>
- ECKHARDT, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. **Hydrological Processes**, v. 19, p. 507–515.

- EMMANUEL, I.; ANDRIEU, H.; LEBLOIS, E.; JANEY, N.; PAYRASTRE, O. (2015). Influence of rainfall spatial variability on rainfall–runoff modelling: Benefit of a simulation approach?. **Journal of Hydrology**, v. 531, n. 2, p. 337-348. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.058>
- FAN, F. M., COLLISCHONN, W., SORRIBAS, M. V., PONTES, P. R. M. (2013). Sobre o início da rede de drenagem definida a partir dos modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 241-257.
- FARES, A.; AWAL, R.; MICHAUD, J.; CHUC, P.S.; FARES, S.; KODAMA, K.; ROSENER, M. (2014). Rainfall-runoff modeling in a flashy tropical watershed using the distributed HL-RDHM model. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 3436–3447.
- FRITZEN, M.; BINDA, A. L. (2011). Alterações no Ciclo Hidrológico em Áreas Urbanas: Cidade, Hidrologia e Impactos no Ambiente. Goiânia-GO. **Ateliê Geográfico**, v. 5, n. 3, p. 239-254. December.
- GIBBS, M. S.; DANDY, G. C.; MAIER, H. R. (2010). Evaluation of Parameter Setting for Two GIS Based Unit Hydrograph Models. **Journal of Hydrology**, v. 393, p. 197-205.
- GRALER, B.; VAN DEN BERG, M. J.; VANDENBERGHE, S.; PETROSELLI, A.; GRIMALDI, S.; DE BAETS, B.; VERHOEST, N. E. C. (2013). Multivariate Return Periods in Hydrology: A Critical and Practical Review Focusing on Synthetic Design Hydrograph Estimation. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 1281–1296.
- GREENE, R. G.; CRUISE, J. F. (1995). Urban watershed modeling using geographic information system. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 121, n. 4, p. 318–325.

- GRIMALDI, E. S.; PETROSELLI, A.; NARDI, F. (2012). A Parsimonious Geomorphological Unit Hydrograph for Rainfall–Runoff Modelling in Small Ungauged Basins. **Hydrological Sciences Journal**, v. 57, n.1, p. 73-83. DOI: 10.1080/02626667.2011.636045.
- HASENACK, H.; WEBER, E.; MARCUZZO, S. (org.) (2008). Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre: **Geologia, Solos, Drenagem, Vegetação e Ocupação**. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente. 84p.
- JAKEMAN, A. J.; HORNBERGER, G. M. (1993). How Much Complexity Is Warranted in a Rainfall-Runoff Model?. **Water Resources Research**, v. 29, n. 8, p. 2637-2649, august.
- JENA, S. K.; TIWARI, K. N.; PANDEY, A.; MISHRA, S. K. (2012). RS and Geographical Information System – Based Evaluation of Distributed and Composite Curve Number Techniques. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, p. 1278–1286. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000651
- JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis, Photogramm. **Eng. Remote Sens.**, Vol. 54, n. 11, p. 1593-1600.
- KHALEGHI, M. R.; GHOLAMI, V.; GHODUSI, J.; HOSSEINI, H. (2011). Efficiency of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph method in flood hydrograph simulation. **Catena**, v. 87, p. 163–171.
- LAJO, A. A. M. (2003). Uso da legenda corine na para estimar as alterações no escoamento superficial em uma microbacia de drenagem urbana através do método racional e hidrograma unitário de snyder. 81p. **Dissertação** (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), UFMGS, Campo Grande, MS.

- LOBLIGEOIS, F.; ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; TABARY, P.; LOUMAGNE, C. (2014). When does higher spatial resolution rainfall information improve streamflow simulation? An evaluation using 3620 flood events. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 18, p. 575–594. DOI: 10.5194/hess-18-575-2014
- MACINI, M.; ROSSO, R. (1989). Using GIS to assess spatial variability of SCS Curve Number at the basin scale. **IAHS**, n. 181. May.
- MAJIDI, A.; MORADI, M.; VAGHARFADRD, H.; PURJENAIE, A. (2012). Evaluation of Synthetic Unit Hydrograph (SCS) and Rational Methods in Peak Flow Estimation (Case Study: Khoshehayeh Zarrin Watershed, Iran). **International Journal of Hydraulic Engineering**, v. 1, n. 5, p. 43-47. DOI: 10.5923/j.ijhe.20120105.03.
- MCCUEN, R. H.; WONG, S. L.; RAWLS, W. J. (1984). The Role of Sensitivity Analysis in Hydrologic Modeling. **Journal of Hydrology**, v. 110, p. 887-904.
- MAZIERO, E. (2010). Histograma tempo/área geoprocessado: uso em modelo chuva-vazão concentrado. 116p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil), UFSM, Santa Maria, RS.
- MEJIA, A. I.; MOGLEN, G. E. (2010). Impact of the Spatial Distribution of Imperviousness on the Hydrologic Response of an Urbanizing Basin. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 3359–3373. DOI: 10.1002/hyp.7755.
- MELESSE, A. M.; GRAHAM, W. D. (2004). Storm runoff prediction based on a spatially distributed travel time method utilizing remote sensing and gis. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 40, n. 4, p. 863-879.
- MIRANDA, A. C. R.; PRUSKI, F.; MARTINEZ, M. A.; CECON, P. R. (2014). Métodos de Separação dos Escoamentos Superficial Direto e Subterrâneo: Estudo de Caso para a

- Bacia do Rio das Velhas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2, p. 169-181, abr/jun. DOI: 10.21168/rbrh.v19n2.p169-181.
- MISHRA, S. K.; JAIN, M. K.; BABU, P. S.; VENUGOPAL, K.; KALIAPPAN, S. (2008). Comparison of AMC-dependent CN-conversion Formulae. **Water Resour Manage**, v. 22, p. 1409-1420. DOI: 10.1007/s11269-007-9233-5
- MOGLEN, G. E. (2000). Effect of Orientation of Spatially Distributed Curve Numbers in Run-off Calculations. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 36, n. 6. December.
- MOG, W.; CAMPOS, H. A.; PICCININI, L. S. (2014). Análise morfológica de espaços urbanos em bacias hidrográficas: um olhar sobre o entorno do Arroio Dilúvio Porto Alegre. **Cadernos. Metrópole**, v. 16, n. 31, p. 221-239. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2236-9996.2014-3110>
- MORAES, J. M.; SCHULER, A. E.; GUANDIQUE, M. E. G.; MILDE, L. C.; GROOP, J. D.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. (2003). Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n.1, p. 61-70, jan./mar.
- NARAYAN, K.; DIKSHIT, P. K. S.; DWIVEDI, S. B. (2012). GIS Supported Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH) of Varuna River Basin using Geomorphological Characteristics. **International Journal of Advances in Earth Sciences**, v.1, n. 2, p. 68-76.
- NETO, J. R. A.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N.; PINHEIRO, A. R. (2012). Otimização do número de curva (CN-SCS) para diferentes manejos na região semiárida, Ceará, Brasil. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p. 264–279.

- NOTO, L. V.; LOGGIA, G. L. (2007). Derivation of a distributed unit hydrograph integrating GIS and remote sensings. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 6, November/December.
- OLIVERA, F. (2001). Extracting hydrologic information from spatial data for HMS modeling. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 6, n. 6, p. 524–530.
- PAUDEL, M.; NELSON, E. J.; SCHARFFENBERG, W. (2009). Comparison of Lumped and Quasi-Distributed Clark Runoff Models Using the SCS Curve Number Equation. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, n. 10. October.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; SILVEIRA, A. L. L. (2006). Improvements in Large Scale drainage Networks Derived from Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, v. 42. DOI:10.1029/2005WR004544.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. (2007). River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model. **Journal of Hydrology**, v. 343, n. 3-4, p. 127–139.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. (2008). Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 2, n. 2, p. 84-95.
- PAULINO, P. F. (2014). Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método SCS na determinação de hidrogramas de cheia em bacias urbanas. 128p. **Dissertação** (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento), EESC, São Carlos, SP.
- PEREIRA, M. A. F.; CAMPO, G. F. N.; KOBIYAMA, M.; CASTRO, N. M. R. (2016). Regionalização com geometria hidráulica e fractal: estudo de caso com hidrograma unitário instantâneo geomorfológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p. 347-359. Abr/jun. DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n2.p347-359>

- PINTO, N. L. S. W.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. (1976.). **Hidrologia básica**. São Paulo, Edgard Blücher, 278p.
- RICHARDS, J. A.; JIA, X. (1999). **Remote Sensing Digital Image Analysis**: an introduction. Terceira edição. Springer – Verlag.
- RODRIGUEZ, I. I.; VALDES, J. B. (1979). The geomorphologic structure of hydrologic response. **Water Resour. Res.**, v. 15, n. 6, p. 1409–1420. Dez.
- RUTKOWSKA, A.; KOHNOVÁ, S.; BANASIK, K.; SZOLGAY, J.; KARABOVÁ, B. (2015). Probabilistic Properties of a Curve Number: A Case Study for Small Polish and Slovak Carpathian Basins. **Journal of Mountain Science**, v. 12, n. 3, p. 533-548. DOI:10.1007/s11629-014-3123-0
- SANTOS, V. D. (2006). Drenagem urbana em áreas especiais: **o caso da bacia fechada do bairro de oitizeiro, João Pessoa**. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia urbana), Universidade Federal da Paraíba.
- SARANGI, A.; MADRAMOOTOO, C. A.; ENRIGHT, P.; PRASHER, S. O. (2007). Evaluation of three unit hydrograph models to predict the surface runoff from a Canadian watershed. **Water Resources Management**, v. 21, p. 1127–1143.
- SARAVANAN, E.; MAJULA, R. (2015). Geomorphology Based Semi-Distributed Approach for Modeling Rainfall-Runoff Modeling Using GIS. International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 908-916.
- SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M. (2011). Critérios para Classificação Hidrológica de Solos Tropicais Brasileiros. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, v. 19, Maceió, Brasil. Anais. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). 20p.

- SARTORI, A.; GENOVEZ, A. B.; NETO, F. L. (2005). Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com 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.
- SARTORI, A.; GENOVEZ, A. B.; NETO, F. L. (2005). Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 19-29.
- SERRA, L. S. (2017). Incertezas no cálculo da declividade para a simulação chuva-vazão com abordagem distribuída NRCS-CN-HU. 56p. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Engenharia Ambiental), UFPB, João Pessoa, PB.
- SHENG, J.; WILSON, J. P. (2009). Watershed urbanization and changing flood behavior across the Los Angeles metropolitan region. **Nat Hazards**, v. 48, p. 41-57. DOI 10.1007/s11069-008-9241-7
- SILANS, A. M. B. P.; ALMEIDA, C. N.; ALBUQUERQUE, J. S.; PAIVA, E. D. B. (2000). Aplicação do Modelo do Rio do Peixe-Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 5-19, jul./set.
- SILVA, G. N. F.; ARAÚJO, J. V. G. (2013). Uso do geoprocessamento no cálculo do tempo de concentração da água da chuva em ambientes urbanos. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE. <Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1551.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2015.

- SILVA, E. A.; TUCCI, C. E. M. (1998). Relação entre as vazões máximas diária e instantânea. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 1, p. 133-151, jan./mar.
- SILVEIRA, A. L. L. (2005). Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 1, p. 5-23, jan./mar.
- SILVEIRA, G. M. (2010). Análise de sensibilidade de hidrogramas de projeto aos parâmetros de sua indefinição indireta. 244p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil), USP, São Paulo, SP.
- SILVEIRA, L. L. S. (2016). Fator de Pico para Hidrogramas Unitários Sintéticos Triangulares. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 46-52, jan./mar.
- SILVEIRA, A. L. L. (2000). **Impactos hidrológicos da urbanização em Porto Alegre**, In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. Avaliação e Controle da Drenagem Urbana, Editora da Universidade/UFRGS, Porto Alegre, p. 153-163.
- SILVEIRA, A. L. P.; DESBORDES, M. (1999). Modelo hidrológico distribuído urbano com poucos parâmetros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, n.1, p. 61-70, jan./mar.
- SMITH, M.; KOREN, V.; ZHANG, Z.; REED, S.; PAN, J.; MOREDA, F. (2004). Runoff response to spatial variability in precipitation: an analysis of observed data. **Journal of Hydrology**, v. 298, n. 1-4, p. 267–286.
- TARGA, M. S.; BATISTA, G. T.; DINIZ, H. D.; DIAS, N. W.; MATOS, F. C. (2012). Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 120-142. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.905>

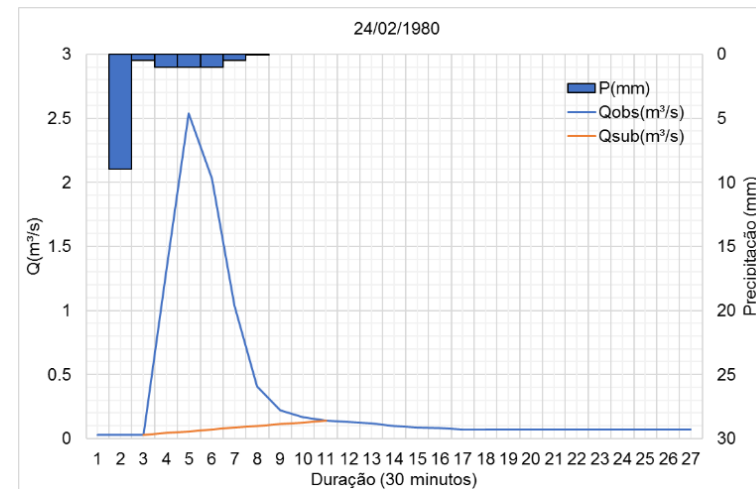
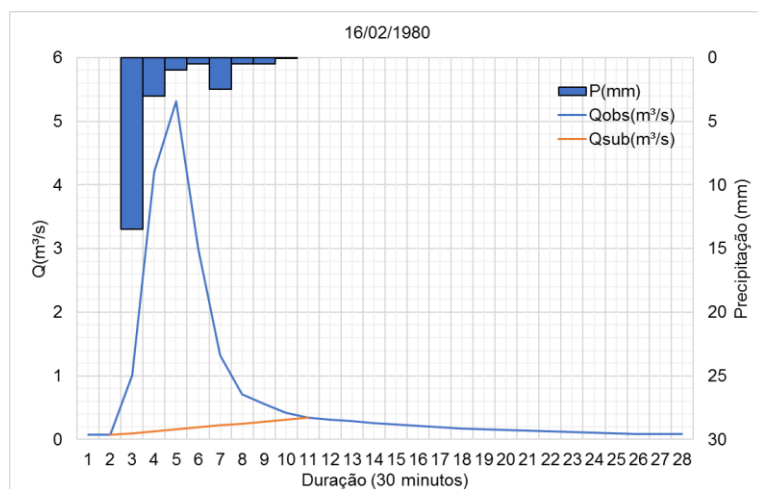
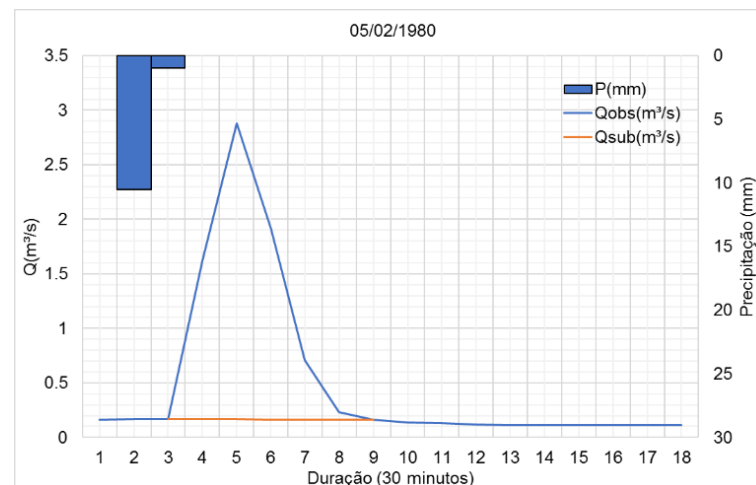
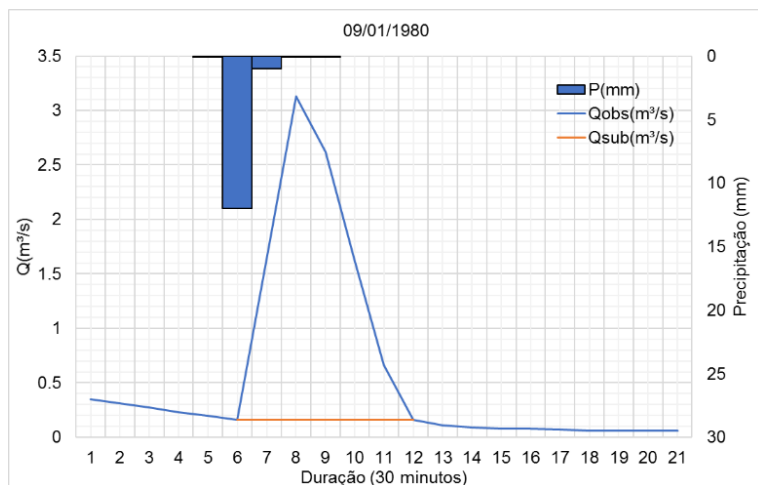
- TETZLAFF, D.; UHLENBROOK, S. (2005). Significance of spatial variability in precipitation for process-oriented modelling: results from two nested catchments using radar and ground station data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 9, p. 29–41.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. (1995). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: UFRGS, 428p. (Coleção da ABRH).
- TUCCI, C. E. M. (1997). **Hidrologia ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 943p. (Coleção da ABRH).
- TUCCI, C. E. M. (2003). Parâmetros do Hidrograma Unitário para Bacias Urbanas Brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 195–199, abr./jun.
- TUCCI, C. E. M. (2005). **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS, 678p. (Coleção da ABRH).
- USDA-NRCS (U.S. Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service) (1972). **National engineering handbook**, Section 4, Hydrology, Chapter 21, Design Hydrographs, Washington, DC.
- USDA-NRCS (U.S. Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service) (2004). **National engineering handbook**, Section 4, Hydrology, Chapter 11, Showmelt, Washington, DC.
- USDA-TR-55 (U.S. Department of Agriculture-Natural Technical release 55) (1986). **Urban hydrology for small watersheds**, Second Ed., June, Washington, DC.
- VENDRAME, I. F.; LOPES, W. A. B. (2005). Análise do Crescimento Urbano e seus Efeitos na Mudança da Dinâmica de Escoamento Superficial da Bacia do Pararangaba. **Anais**

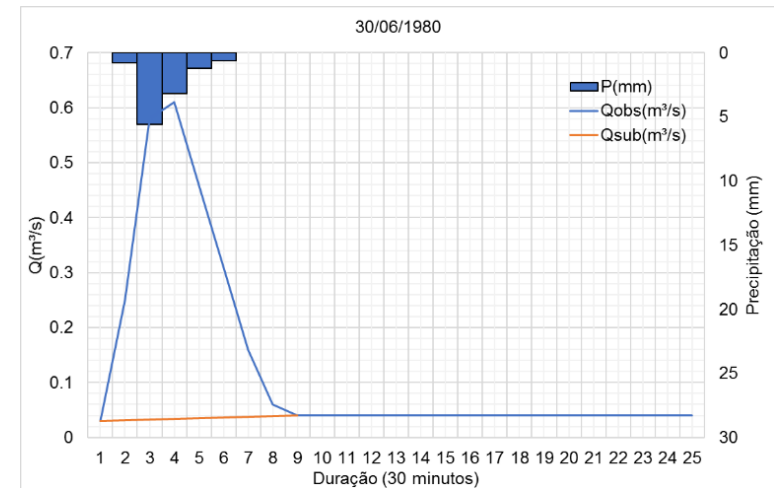
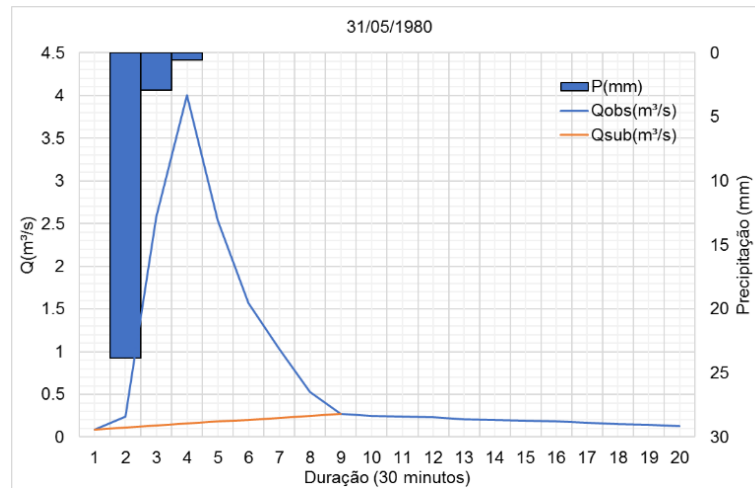
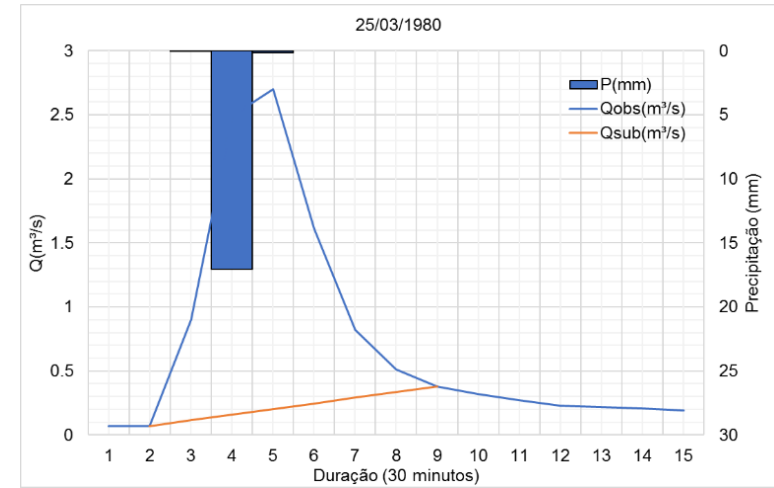
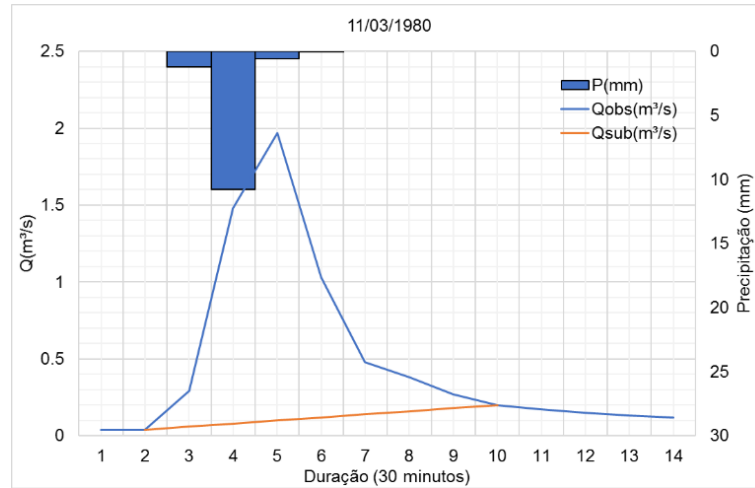
XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, v. 16, n. 21, Abril, INPE, p. 2555-2562.

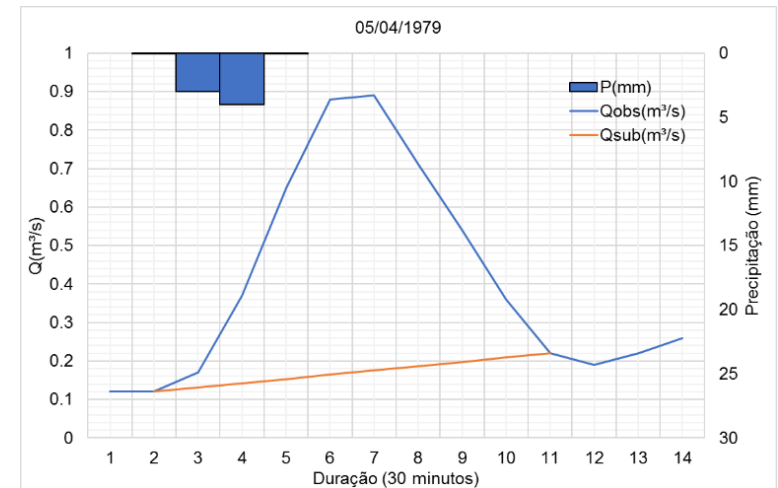
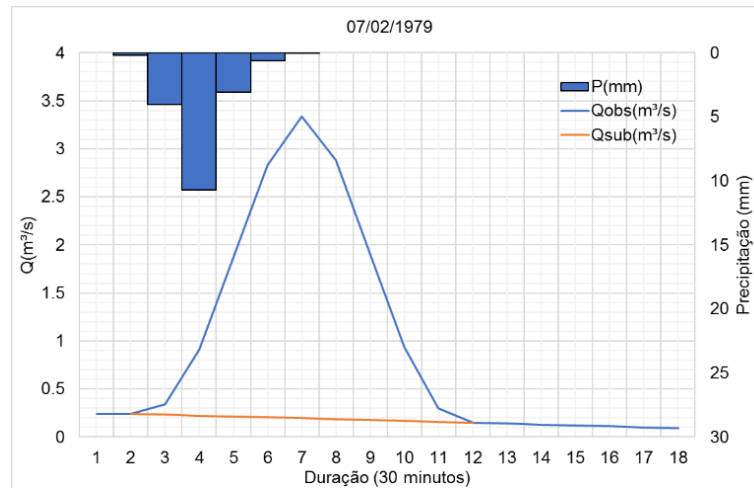
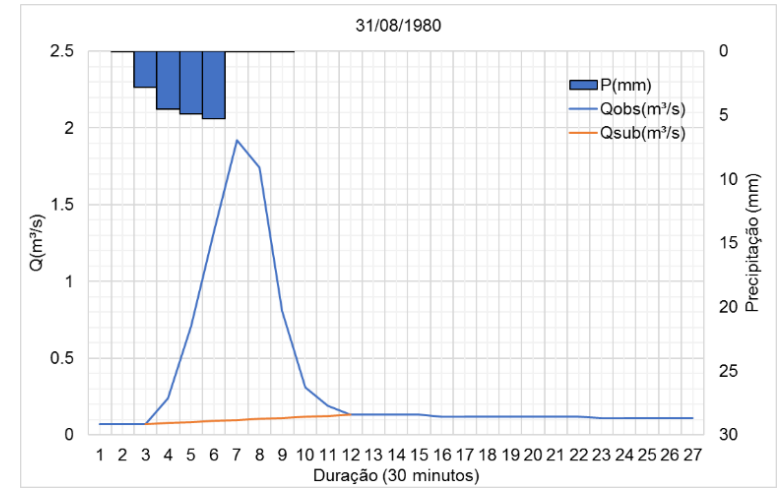
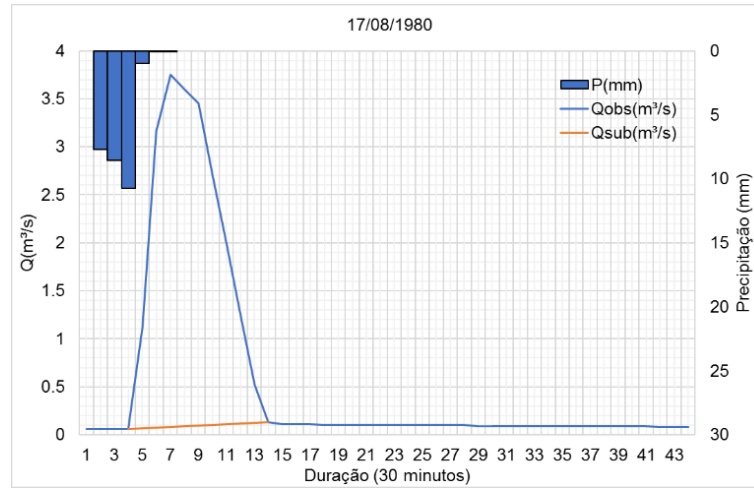
ZHANG, D.; QUAN, J.; WANG, F.; HE, X. Flash Flood Simulation Using Geomorphic Unit Hydrograph Method: Case Study of Headwater Catchment of Xiapu River Basin, China (2014). **Cuny Academic Works**. Disponível em: http://academicworks.cuny.edu/cc_conf_hic/132. Acesso em: 20 nov. 2016.

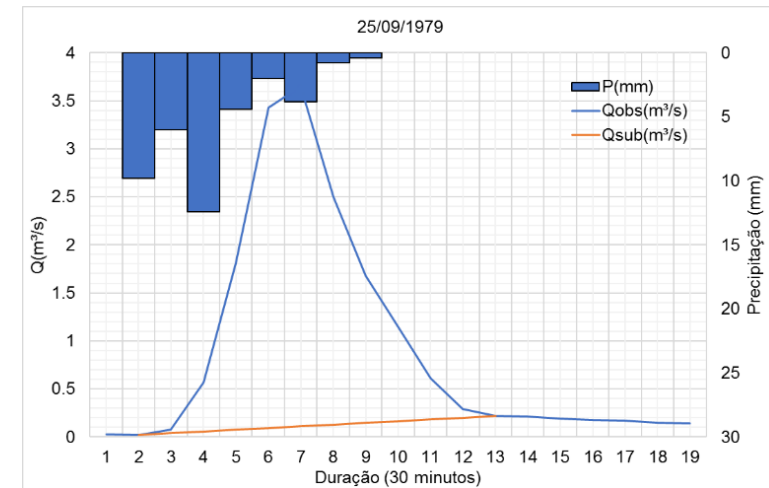
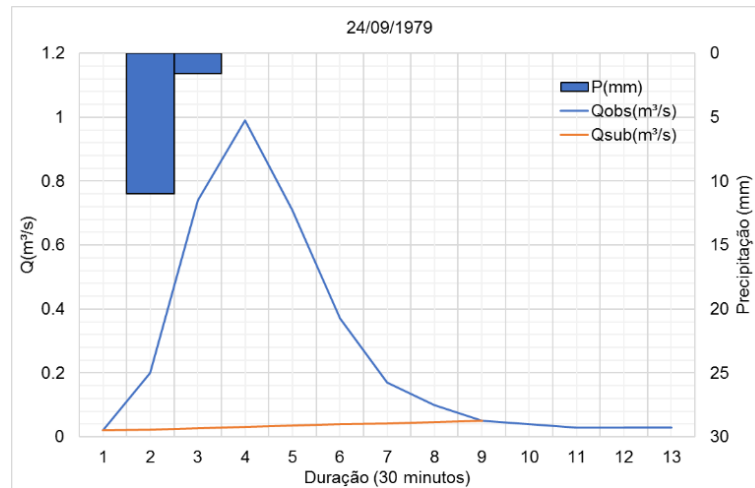
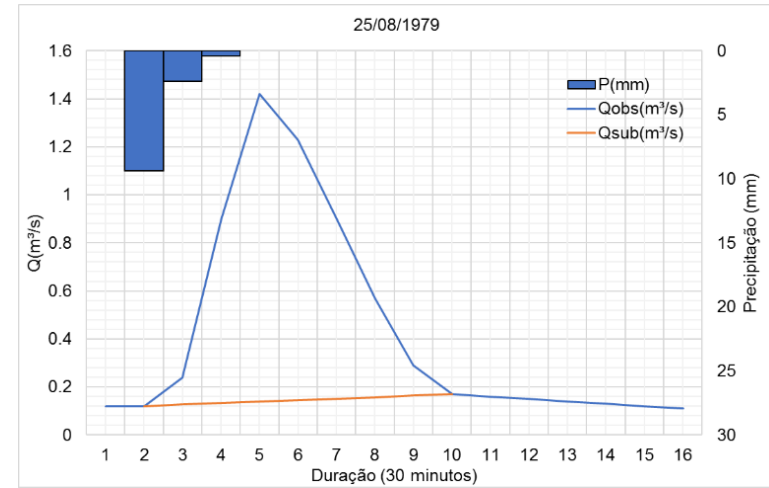
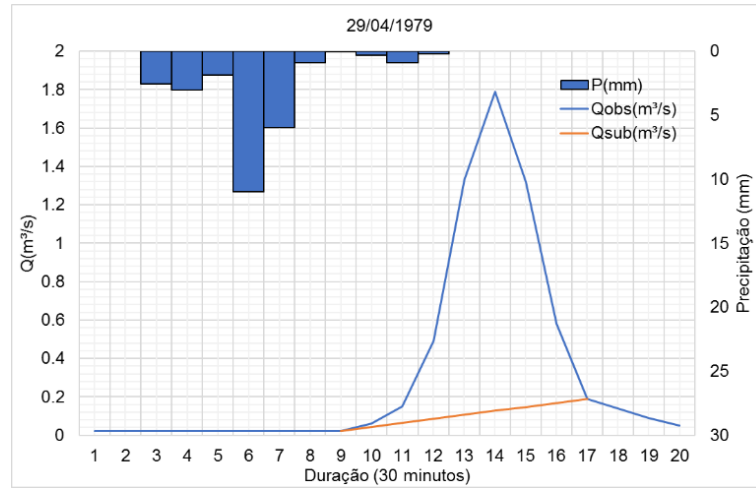
APÊNDICE A

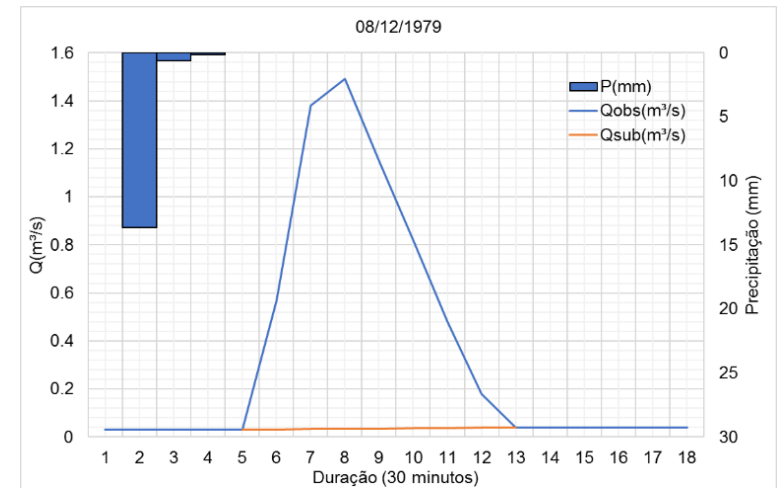
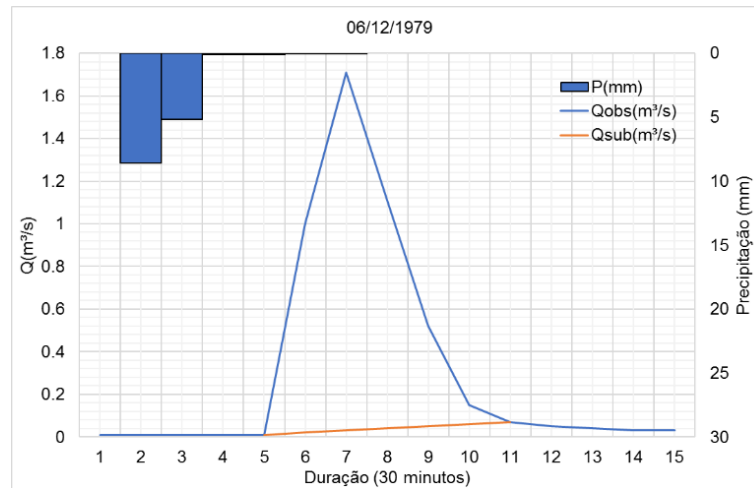
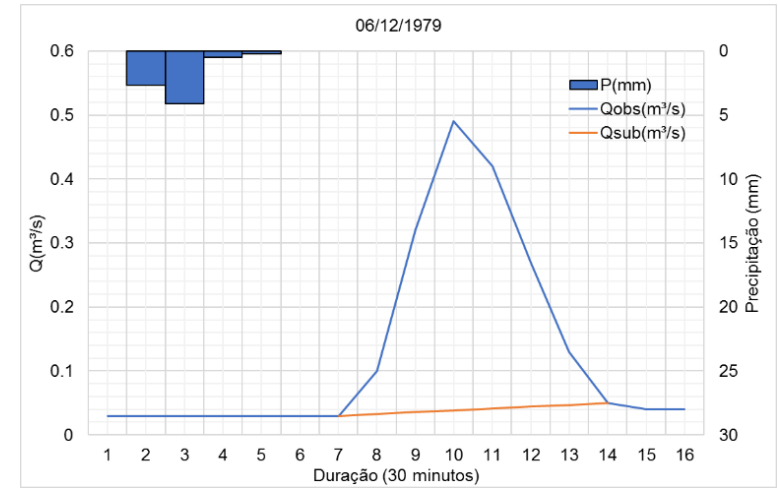
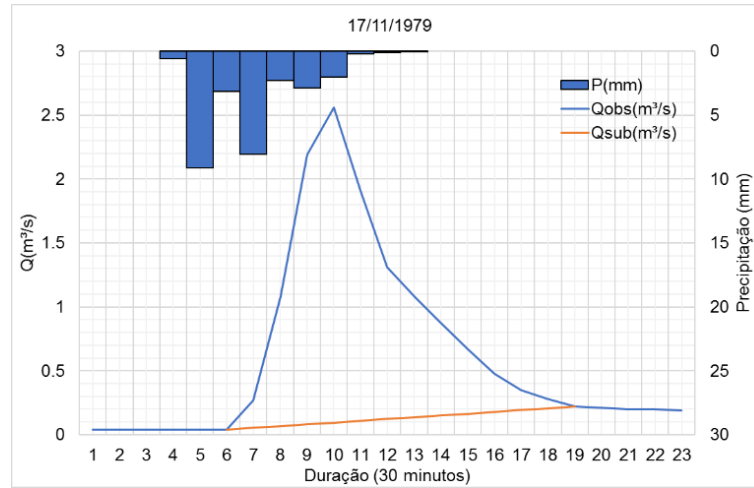
Vazões observadas *versus* Vazões subterrâneas

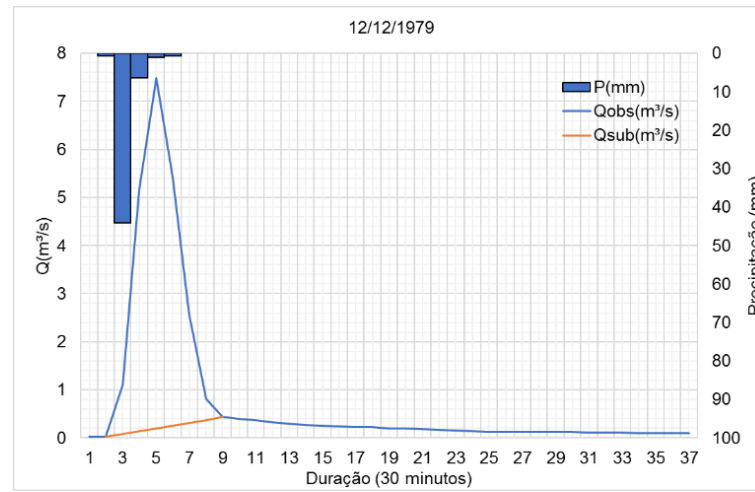












APÊNDICE B

Vazões observadas *versus* Vazões simuladas

