



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DA REPRESENTATIVIDADE DA TRANSFORMAÇÃO CHUVA-
VAZÃO COM O MÉTODO SCS-CN-HUS NA SUB-BACIA
HIDROGRÁFICA CASCATA I EM PORTO ALEGRE

VICTÓRIA LINA SILVA DE CASTRO

João Pessoa - PB
Junho de 2017

VICTÓRIA LINA SILVA DE CASTRO

**ANÁLISE DA REPRESENTATIVIDADE DA TRANSFORMAÇÃO CHUVA-
VAZÃO COM O MÉTODO SCS-CN-HUS NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA
CASCATA I EM PORTO ALEGRE**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como pré-requisito para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Ambiental pela Universidade
Federal da Paraíba.

Área de concentração: Recursos
Hídricos.

Orientador Prof.º. Dr. Adriano Rolim da
Paz.

João Pessoa - PB

Junho de 2017

C355a Castro, Victória Lina Silva de

Análise da representatividade da transformação chuva-vazão com o método SCS-CN-HUS na sub-bacia hidrográfica Cascata I em Porto Alegre. / Victória Lina Silva de Castro - João Pessoa: UFPB, 2017.

57fl. il.:

Orientador: Prof.^o. Dr. Adriano Rolim da Paz

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Ambiental Centro de Tecnologia / Campos I / Universidade Federal da Paraíba.

1. Inundações 2. Simulação chuva-vazão 3. Precipitação excedente 4. Hidrograma Unitário I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.d. 626.86 (043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

VICTÓRIA LINA SILVA DE CASTRO

ANÁLISE DA REPRESENTATIVIDADE DA TRANSFORMAÇÃO CHUVA- VAZÃO COM O MÉTODO SCS-CN-HUS NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA CASCATA I EM PORTO ALEGRE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 31/05/2017 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Adriano Rolim da Paz

Adriano Rolim da Paz
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO

L. L. I. da Ue

Ana Cristina Souza da Silva
UFPB

APROVADO

Cristiano das Neves Almeida

Cristiano das Neves Almeida
UFPB

APROVADO

Adriano Rolim da Paz

Prof. Adriano Rolim da Paz
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Célia e Torres, pela dedicação, companheirismo, amor incondicional e apoio em todas as minhas escolhas; e às minhas tias, Céu, Eliane e Lúcia, pelo carinho e por estarem sempre presentes em minha vida;

A Auritônio, pela paciência, cuidado e incentivo em todos os momentos;

Ao professor Adriano Rolim da Paz, meu orientador, pela confiança, conhecimentos passados e por toda ajuda durante a graduação, no projeto de iniciação científica e especialmente durante a elaboração deste trabalho;

A Fagner Costa, que contribuiu significativamente neste trabalho, elaborando uma rotina computacional em linguagem MatLab e por sempre atenciosamente me esclarecer a respeito de eventuais dúvidas;

Aos meus colegas do período 2011.1, em especial André, Antero, Augusto, Camila, Cássio, Cinthia, Emanuella, Kenya, Larissa, Marcela, Moana e Vanessa, pela amizade e por toda ajuda durante essa jornada;

Ao grupo de pesquisa no qual estive inserida, em especial a Antônio Henrique, Dário Macedo, Laís Paulino, por compartilhar conhecimentos;

Aos bons professores da graduação e todos os professores que por mim passaram, por contribuir com meu crescimento moral e intelectual;

E a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, na elaboração deste trabalho.

RESUMO

Um dos grandes problemas ocasionados pela urbanização são as inundações que geram prejuízos materiais e sociais, desta forma, é importante prever estes eventos e quantificá-los a fim de realizar o planejamento adequado dos sistemas de drenagem. Para isto, são realizados estudos hidrológicos com a aplicação de modelos matemáticos, como por exemplo, os modelos chuva-vazão em que as vazões são determinadas em função da precipitação. Um dos métodos frequentemente utilizados é o método Curva Número (CN) aplicado juntamente com o teorema do Hidrograma Unitário Sintético (HUS), ambos do SCS (SCS-CN-HUS). Porém estes métodos foram desenvolvidos com base em condições muito específicas, por isso, sua representatividade para bacias com características diferentes é questionada por muitos pesquisadores. Dentro desse contexto, este estudo procura comparar os resultados obtidos a partir do método SCS-CN-HUS com os dados observados e também calibrar dois parâmetros empíricos do método (fator tempo de pico ($T_p = 0,60$) e perdas iniciais ($\lambda = 0,20$)), sendo aplicada para a sub-bacia hidrográfica Cascata I do Arroio Dilúvio, localizada em Porto Alegre. Foram produzidos vários hidrogramas utilizando diversos valores de λ e fator T_p , para cada evento da calibração. Os pares de parâmetros que proporcionaram melhores resultados foram utilizados para validação. Foi identificado que os hidrogramas calculados pelo método SCS-CN-HUS original não representam satisfatoriamente a simulação chuva-vazão, apresentando melhores resultados quando aplicados com valores bem menores para os parâmetros T_p e λ , em relação aos originais. Para o fator T_p foi adotado o valor 0,18 e para λ 0,01, 0,13 ou 0,32, variando de acordo com o total precipitado para o evento. Além disso, os erros percentuais relativos em relação aos dados observados, considerando de modo geral, em média, reduziram de 100% para menos de 40%, quando utilizados os parâmetros calibrados para este trabalho.

Palavras-chaves: Inundações, simulação chuva-vazão, precipitação excedente, hidrograma unitário.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferença percentual dos valores de precipitação excedente calculada em relação às observadas em função da magnitude do evento..	20
Figura 2 – (a) Princípio da proporcionalidade no conceito do HU. (b) Princípio da superposição no conceito do HU..	22
Figura 3 – Hidrograma Unitário Sintético do SCS.....	23
Figura 4 – Discretização Hidrograma Unitário Sintético do SCS.....	24
Figura 5 – Localização da bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio.....	26
Figura 6 – Localização da rede de monitoramento hidrológico.....	27
Figura 7 – Modelo digital de elevação da sub-bacia hidrográfica Cascata I e sua respectiva rede de drenagem.....	28
Figura 8 – Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia hidrográfica Cascata I.	28
Figura 9 – Fluxograma da metodologia utilizada nesse trabalho.	29
Figura 10 – Exemplo de evento utilizado no estudo..	30
Figura 11 – Exemplo de traçado do percurso da água para cálculo do T_c	31
Figura 12 – Divisão em classes dos trechos e sub-trechos dos rios da sub-bacia hidrográfica Cascata I.	34
Figura 13 – Esquema representativo de obtenção do escoamento superficial..	35
Figura 14 – Mapa de CNs da sub-bacia hidrográfica Cascata I..	36
Figura 15 – Comparação entre o hidrograma observado (em azul) e o hidrograma calculado (em vermelho).	40
Figura 16 – Erro relativo do volume total (em azul), T_p (em vermelho) e Q_p (em verde) entre o hidrograma observado e o hidrograma calculado pelo método original.	41
Figura 17 – Processo de seleção dos melhores pares de valores do fator T_p e λ para os eventos de calibração (os diferentes símbolos representam eventos distintos, conforme a legenda).	42
Figura 18 – Comparação entre o hidrograma observado (em azul) e o hidrograma calculado (em vermelho) com o melhor par de parâmetros selecionados para cada evento.....	43
Figura 19 – Erro relativo do volume total (em azul), T_p (em vermelho) e Q_p (em verde) entre o hidrograma observado e o hidrograma calculado com o melhor par de parâmetros selecionados para cada evento.....	44

Figura 20 – (a) Relação entre T_p , λ e C_g . b) Relação entre T_p , λ e P_t	45
Figura 21 – Faixas utilizadas para estabelecer o valor de T_p e λ em relação à precipitação.	46
Figura 22 – Comparação entre o hidrograma observado (em azul) e o hidrograma calculado (em vermelho) com parâmetros de acordo com a faixa estabelecida, para os eventos da calibração.	47
Figura 23 – Erro relativo do volume total (em azul), T_p (em vermelho) e Q_p (em verde) entre o hidrograma observado e o hidrograma calculado com parâmetros de acordo com a faixa estabelecida, para os eventos da calibração.....	48
Figura 24 – Comparação entre o hidrograma observado (em azul) e o hidrograma calculado (em vermelho) com parâmetros de acordo com a faixa estabelecida, para os eventos da validação.	49
Figura 25 – Erro relativo do volume total (em azul), T_p (em vermelho) e Q_p (em verde) entre o hidrograma observado e o hidrograma calculado com parâmetros de acordo com a faixa estabelecida, para os eventos da validação.	50
Figura 26– Comparação entre precipitação efetiva observada e calculada com diferentes valores de λ (os pontos mais escuros correspondem aos eventos de precipitação mais baixa, os pontos cinzas são as precipitações médias e os pontos brancos representam as precipitações maiores, de acordo com as faixas de precipitação descritas na Figura 21).....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização dos grupos hidrológicos de solo para determinar o CN.....	18
Tabela 2 – Valores do parâmetro CN para a condição II de umidade antecedente do solo.	19
Tabela 3 – Correção dos valores de CN de acordo com a umidade antecedente.	19
Tabela 4 – Processo de convolução na teoria do hidrograma unitário.	22
Tabela 5 – Característica dos eventos selecionados da sub-bacia hidrográfica Cascata I.....	30
Tabela 6 – Valores do coeficiente de Manning para sub-bacia Cascata I.....	33
Tabela 7 – Valores de CNs e as áreas correspondentes que ocupam.	37
Tabela 8 – Comparação dos valores observados e calculados pelo método original.	41
Tabela 9 – Comparação dos valores observados e calculados com o melhor par de parâmetros selecionados para cada evento.....	44
Tabela 10 – Comparação dos valores observados e calculados com parâmetros de acordo com a faixa estabelecida, para os eventos da calibração.....	47
Tabela 11 – Comparação dos valores observados e calculados com parâmetros de acordo com a faixa estabelecida, para os eventos da validação.....	49
Tabela 12 – Precipitação efetiva calculada com diferentes valores para λ e comparada com a precipitação efetiva observada.	51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
1.1.1 Objetivo geral.....	12
1.1.2 Objetivos específicos.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 O efeito da urbanização em bacias hidrográficas.....	13
2.2 Modelagem hidrológica.....	15
2.2.1 Aspectos gerais.....	15
2.2.2 Modelos chuva-vazão.....	15
2.3 Método de precipitação excedente do SCS	17
2.4 Hidrograma unitário	21
2.4.1 Conceitos.....	21
2.4.2 HU sintético SCS	23
3. METODOLOGIA	26
3.1 Área de estudo e dados disponíveis.....	26
3.2 Visão geral	28
3.3 Seleção de eventos	29
3.4 Cálculo do tempo de concentração.....	31
3.5 Separação do escoamento superficial e subterrâneo	35
3.6 Transformação chuva-vazão pelo método SCS-CN-HUS	36
3.6.1 Aplicação do método SCS-CN.....	36
3.6.2 Aplicação do método SCS-HUS	37
3.6.3 Calibração de parâmetros	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Abordagem original SCS-CN-HUS	39
4.2 Calibração SCS-CN-HUS por evento	42
4.2.1 Resultados por evento	42
4.2.2 Análise dos parâmetros calibrados.....	44
4.3 Simulação SCS-CN-HUS para parâmetros calibrados.....	46
4.3.1 Eventos usados na calibração.....	46
4.3.2 Eventos de validação.....	48
4.3.3 Em relação à precipitação efetiva.....	50
5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1. INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da população nas últimas décadas, atrelado à expansão das cidades, gera consequentemente o aumento das áreas impermeáveis. A impermeabilização do solo por sua vez, aumenta a contribuição das águas pluviais acima da capacidade de infiltração do solo e dos sistemas de drenagem existentes, intensificando as inundações urbanas e ribeirinhas (TUCCI, 2005a).

As inundações podem causar graves danos econômicos e sociais, dessa maneira é importante haver uma maior preocupação da população, dos pesquisadores e dos gestores sobre este assunto. Os danos observados hoje em dia pelos eventos de inundações ressaltam a falta de preparo e a gestão inadequada dos sistemas de drenagem no Brasil.

A fim de evitar a ocorrência ou minimizar os impactos das inundações, é necessário realizar um planejamento urbano adequado aliado a investimentos em ações preventivas. Para isso, primeiramente é necessário o desenvolvimento científico-tecnológico dos métodos para previsão dos impactos devido à expansão urbana. Estudos hidrológicos com a utilização de modelos matemáticos são as ferramentas consideradas mais adequadas (GARCIA; PAIVA, 2006). Estes modelos são cada vez mais relevantes para melhor entendimento dos fenômenos físicos envolvidos em uma bacia hidrográfica.

Dentre os diversos tipos de modelos hidrológicos, existem os modelos de chuva-vazão, em que a partir da precipitação são determinadas as vazões (TUCCI, 2005b) e desta forma são utilizados para mensurar os impactos decorrentes de diferentes cenários da ocupação da bacia, bem como avaliar diferentes soluções de intervenções no sistema de drenagem (DECINA, 2012).

Em virtude de relativas facilidades de aplicações é frequentemente utilizado o método Curva Número (CN) juntamente com o teorema do Hidrograma Unitário Sintético (HUS), ambos descritos pelo *Soil Conservation Service* – SCS, atualmente *Natural Resource Conservation Service* – NRSC, do Departamento de Agricultura dos EUA.

Estes métodos foram desenvolvidos para pequenas bacias rurais do território norte-americano, com base em condições de máximas precipitações diárias (SUPHUNVORRANOP, 1985), ou seja, foi criado fundamentado em características muito específicas. Por isso, é questionada, por muitos pesquisadores, a representatividade desses métodos para outras bacias com características diferentes das quais os parâmetros foram criados (CUNHA et al., 2015; JEON; LIM; ENGEL, 2014).

Pensando nisto, alguns estudos analisaram em que medida os parâmetros apresentados nestes métodos geram resultados em conformidade com os dados observados e também buscaram calibrar estes parâmetros para outras áreas (AJMAL; KIM 2014; CUNHA et al., 2015; LAUTHARTE, 2015; SILVEIRA, 2016; TASSI et al., 2006; TUCCI, 2003; WOODWARD et al., 2003).

Nesse contexto, este estudo visa comparar os resultados obtidos a partir da aplicação do método SCS-CN e do teorema do SCS-HUS com os dados observados para a sub-bacia hidrográfica Cascata I do Arroio Dilúvio, localizada em Porto Alegre – RS, devido sua disponibilidade de dados observados de eventos chuva-vazão. E dessa forma, analisar a representatividade dos parâmetros empíricos (fator tempo de pico e perdas iniciais) e procurar valores para estes parâmetros que produzam melhores resultados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a representatividade da transformação chuva-vazão com o método SCS-CN-HUS na bacia hidrográfica Cascata I em Porto Alegre.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar o comportamento dos hidrogramas gerados a partir dos valores originais do método SCS-CN-HUS e de diferentes valores adotados para o fator tempo de pico e perdas iniciais;
- Encontrar valores para o fator tempo de pico e perdas iniciais mais representativos em relação aos dados observados;
- Comparar, em relação ao volume total, vazão de pico, tempo de pico e precipitação efetiva, os valores gerados através de dados observados, do método SCS-CN-HUS original e do método SCS-CN-HUS com novos valores para o fator tempo de pico e perdas iniciais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O efeito da urbanização em bacias hidrográficas

O modo característico de urbanização brasileiro, baseado principalmente na concentração populacional e na ocupação desordenada dos centros urbanos, contribuiu para a geração de impactos significativos nas bacias hidrográficas (TUCCI, 2005a). Esses impactos atingem grande parte da população que fica exposta a condições precárias de moradia e saneamento ambiental. O meio ambiente também é afetado devido ao desmatamento, invasão de áreas de preservação, maior geração de resíduos sólidos, poluição da água e do solo, entre outros.

Um dos problemas recorrentes do processo de urbanização que desperta atenção especial é a impermeabilização do solo. O aumento das áreas impermeáveis modifica as condições naturais do meio e interfere nos componentes do ciclo hidrológico da seguinte forma: a infiltração da água precipitada no solo é reduzida e o volume que deixa de infiltrar aumenta o escoamento superficial; também ocorre uma redução do nível do lençol freático devido à falta de alimentação; e há uma redução da evapotranspiração, uma vez que a superfície urbana não retém água na mesma proporção que a cobertura vegetal que foi retirada (FRITZEN; BINDA, 2011; PORTO ALEGRE, 2005; TUCCI, 2005a).

Com a instalação de pavimentos impermeáveis e condutos para o esgotamento das águas pluviais, o tempo de deslocamento do escoamento superficial é reduzido. Dessa forma, associado ao aumento do escoamento superficial está o aumento da velocidade de escoamento que em conjunto geram a elevação e a antecipação das vazões de pico. Tudo isso faz com que sejam ampliadas a magnitude e a frequência das inundações, que comumente resultam em perdas materiais e humanas (CAMPANA, TUCCI, 1999; TUCCI, 2005a).

Para mitigar estes impactos causados pela urbanização é importante a adoção de medidas controladoras ou reguladoras da expansão urbana, como, por exemplo, os requisitos legais que disciplinam o uso do solo e os instrumentos de fiscalização do seu atendimento (TUCCI, 2002).

Além disso, a Lei Federal nº 11.445/2007 – marco regulatório do saneamento básico, estabelece a cobrança de taxas pelo serviço público de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas, levando em conta em cada lote urbano os percentuais de impermeabilização e a existência de dispositivos de amortecimento ou de retenção de água de chuva (BRASIL,

2007). Dessa forma, busca-se frear a impermeabilização do solo e consequentemente os danos causados por ela.

Outro mecanismo para o controle deste impacto é o Plano Diretor de Drenagem Urbana das cidades, que busca evitar perdas econômicas, melhorar as condições de saneamento e qualidade do meio ambiente, integrado com os princípios de outros planos como o de esgotamento sanitário, resíduos sólidos e principalmente o de desenvolvimento urbano e ambiental. Através deste plano é possível ordenar as ações futuras na cidade quanto à drenagem urbana, visando controlar na fonte os potenciais impactos da urbanização (PORTO ALEGRE, 2005).

Na cidade de Porto Alegre, por exemplo, baseado no Plano Diretor de Drenagem Urbana foi elaborado o Decreto Municipal nº 18.611/2014 que regulamenta a drenagem pluvial e visa padronizar: a vazão máxima de saída a ser mantida em todas as novas edificações ou parcelamentos; o volume de retenção necessário à manutenção da vazão máxima; incentivar os empreendedores a utilizarem pavimentos permeáveis e outras medidas de controle na fonte da drenagem urbana (PORTO ALEGRE, 2014).

Para auxiliar em um planejamento mais adequado e contribuir na elaboração dessas medidas controladoras é necessário estimar e quantificar os efeitos desencadeados pela urbanização. Costa (2013) verificou os iminentes impactos da urbanização sobre as inundações urbanas na área da bacia hidrográfica do rio Cuiá, localizada em João Pessoa, e através da simulação de diferentes cenários de uso e ocupação do solo estimou as consequências desse fenômeno.

Targa et al. (2012) também consideraram mudanças no uso e ocupação do solo para estimar o escoamento superficial e o coeficiente de escoamento, concluindo que esses parâmetros aumentam conforme o aumento da densidade populacional ao longo do tempo. Nessa mesma perspectiva, alguns estudos procuram estimar a área impermeável relacionando-a com a densidade habitacional (REIS, PEREIRA FILHO, SILVEIRA, 2011; MENEZES FILHO, TUCCI, 2012), contribuindo para o prognóstico da futura área impermeável de uma bacia hidrográfica para assim poder se planejar com antecedência.

Estudos como o de Garcia e Paiva (2006), Vendrame e Lopes (2005), Brandão e Ferreira (2000) analisaram os hidrogramas gerados por dada precipitação e relataram o aumento e antecipação da vazão de pico, em resposta à crescente urbanização. Nestes estudos é comum a utilização de modelos hidrológicos para o dimensionamento e previsão dos efeitos decorrentes de diferentes cenários de evolução da ocupação da bacia por meio de simulação.

2.2 Modelagem hidrológica

2.2.1 Aspectos gerais

De maneira geral, modelo é uma representação simplificada da realidade, por meio de um conjunto de equações e procedimentos constituído por variáveis e parâmetros (os parâmetros mantêm seu valor inalterado durante todo o processo estudado e as variáveis podem mudar ao longo do tempo que o modelo estiver sendo executado). Modelo também pode ser entendido como a representação do comportamento de um sistema (estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato), que num dado intervalo de tempo interrelaciona-se com uma entrada (causa ou estímulo de energia ou informação) e uma saída (efeito ou resposta de energia ou informação) (TUCCI, 2005b; RENNO, SOARES, 2000).

A modelagem hidrológica é uma ferramenta desenvolvida pela ciência que busca melhor entender e representar os fenômenos naturais associados ao ciclo hidrológico, os quais dependem de um grande número de fatores. Também busca prever, através de modelos, o comportamento da bacia hidrográfica quando submetida a diferentes ações como precipitações extremas, modificações do uso do solo, estiagens, entre outras. É fundamental em estudos ambientais, na gestão dos recursos hídricos e em projetos de obras hidráulicas (TUCCI, 2005b; MARINHO FILHO et al., 2012).

Devido à grande variação das características físicas das bacias hidrográficas e o vasto número de processos envolvidos no ciclo hidrológico, tem-se desenvolvido um grande número de modelos hidrológicos que se diferenciam em função dos dados utilizados, da discretização realizada, de como os processos são representados e dos objetivos a serem alcançados. Por consequência, existem diversos tipos de modelos hidrológicos com finalidades diversas: alguns buscam calcular a vazão de uma bacia a partir da precipitação, outros simulam o escoamento em canais, também existem aqueles que simulam a concentração de parâmetros de qualidade da água, entre outros (TUCCI, 2005b).

2.2.2 Modelos chuva-vazão

Os modelos chuva-vazão representam a parte do ciclo hidrológico entre a chuva e a vazão. Para isso, estes modelos buscam descrever por meio de algoritmos os diferentes processos da relação precipitação-vazão, como: a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, infiltração no solo, o escoamento superficial,

subterrâneo e em canais, rios e córregos. Portanto, utilizando esse tipo de modelo é possível encontrar vazões a partir da precipitação (TUCCI, 2005b).

Segundo Tucci (2005b), foi a partir da necessidade de se obter séries hidrológicas mais longas e representativas de vazões que surgiram os modelos chuva-vazão, uma vez que as séries de precipitação, devido à facilidade de obtenção e operação e o custo, geralmente, são mais longas que as de vazão. Os primeiros modelos buscavam descrever os processos de cada componente do ciclo hidrológico separadamente, dessa forma, os sistemas eram delimitados para se obter a solução de um problema específico. Porém, sabe-se que todos os processos ocorrem na bacia hidrográfica de maneira interativa, então com auxílio dos avanços computacionais, surgiram modelos hidrológicos que reúnem vários processos para descrever a transformação da precipitação em vazão.

Além disso, as séries de vazões deixaram de ser homogêneas ou estacionárias, devido às modificações no uso do solo e obras hidráulicas na bacia hidrográfica, neste caso, os modelos utilizados podem ter algumas limitações e requerem uma metodologia mais sofisticada, para simular cenários de desenvolvimento diferentes daquele utilizado para o ajuste do modelo, pois seus parâmetros englobam características da bacia anterior às modificações (TUCCI, 2005b).

Portanto, para utilizar esses modelos é importante atentar para os objetivos para os quais o modelo será utilizado, suas limitações na representação dos processos e a qualidade e quantidade de informações que serão utilizadas. Além disso, os modelos utilizam critérios de discretização da bacia, podem ser: concentrado, distribuído por sub-bacias e distribuído por módulos. Essas informações são levadas em conta para a escolha do modelo e seus resultados.

Os modelos hidrológicos de chuva-vazão apresentam grande variedade de tipos, desde modelos mais simples, como o Método Racional, que consiste apenas em estimar a vazão máxima de um evento de chuva para uma determinada bacia, considerando que a vazão é diretamente proporcional à área da bacia e à intensidade da chuva. Este método assume que a precipitação ocorre uniformemente em toda a área da bacia, e que a intensidade é constante ao longo da duração da precipitação, ou seja, a precipitação apresenta distribuição espacial e temporal uniformes (TUCCI, 2005b).

Já os modelos hidrológicos distribuídos por módulos ou por unidade hidrológica consideram a variabilidade espacial e temporal da precipitação e a variação das características da bacia hidrográfica no espaço, faz balanços hídricos localizados, determinando parcelas de evapotranspiração, infiltração, escoamento superficiais para cada unidade em estudo (TUCCI, 2005b).

Dentre os diversos tipos de modelos chuva-vazão, existem aqueles que computam a precipitação excedente, através do método da curva-número, do Soil Conservation Service (SCS), e que consideram a teoria do hidrograma unitário, sendo uma prática bastante comum.

2.3 Método de precipitação excedente do SCS

Um dos métodos mais utilizados atualmente para estimativa do escoamento superficial (precipitação excedente/efetiva) é o método Curva Numero (CN) proposto pelo SCS (USDA, 1986). Essa metodologia calcula a precipitação excedente (Equação 1), definida como a parcela de precipitação que esco superficialmente no solo, e que, dependendo da intensidade e da distribuição temporal da precipitação, pode acarretar inundações em áreas urbanas. Essa lâmina esco superficialmente inicialmente pela superfície do solo e depois em cursos d'água mais próximos.

$$\begin{aligned} \text{hexc} &= \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} && \text{quando } P > 0,2S \\ \text{hexc} &= 0 && \text{quando } P \leq 0,2S \end{aligned} \quad (1)$$

Sendo, hexc é a lâmina de precipitação excedente gerada durante o evento de chuva (mm); P é a precipitação ocorrida ao longo do evento de chuva (mm); S é a capacidade do solo em armazenar água (mm).

Assume-se que a perda inicial devido à infiltração, interceptação ou retenção é representada pela Equação 2, em que o valor de λ é fixado em 0,20. Para determinar o valor de S, o método estabelece uma relação empírica entre a capacidade de armazenamento de água da bacia e um índice chamado CN (Equação 3).

$$I_a = \lambda \times S \quad (2)$$

$$S = \frac{25400}{\text{CN}} - 254 \quad (3)$$

Sendo, I_a a abstração inicial (perda inicial); CN um parâmetro adimensional, cujo valor varia entre 0 e 100 – 0 corresponde a um solo de capacidade de infiltração infinita e 100 corresponde a um solo completamente impermeável.

Para determinar o CN, existem valores tabelados em função do tipo de solo, uso e ocupação, ajustados em função da condição de umidade antecedente do solo. A condição de umidade antecedente do solo é caracterizada da seguinte forma:

- Condição I: Solos secos (chuvas nos últimos cinco dias não ultrapassaram 15 mm);
- Condição II: Situação média na época das cheias (chuvas nos últimos cinco dias totalizaram entre 15 e 40 mm);
- Condição III: Solo úmido – próximo da saturação (as chuvas dos últimos cinco dias foram superiores a 40 mm, e as condições meteorológicas foram desfavoráveis para altas taxas de evaporação).

Porém, o SCS reconheceu problemas com esta relação da condição de umidade antecedente com a chuva nos 5 dias antecedentes ao evento de cheia e a utilização destas condições é desencorajada pelo SCS (HAWKINS et al., 2009 apud CUNHA et al. 2015).

Em relação ao tipo de solo, foram criados quatro grupos hidrológicos de solo, que em ordem crescente de potencial de geração de escoamento superficial são: A, B, C e D. E são caracterizados segundo Canholi (2005) de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dos grupos hidrológicos de solo para determinar o CN.

Grupo Hidrológico do Solo	Descrição do Solo	Capacidade de Infiltração (cm/h)
A	Areias e cascalhos profundos ($h > 1,50$ m), muito permeáveis, com alta taxa de infiltração, mesmo quando saturados. Teor de argila até 10%	1,20 - 0,80
B	Solos arenosos com poucos finos, menos profundos ($h < 1,50$ m) e permeáveis. Teor de argila 10% - 20%	0,80 - 0,40
C	Solos pouco profundos com camadas subsuperficiais que impedem o fluxo descendente da água, ou solos com porcentagem elevada de argila (20% - 30%)	0,40 - 0,15
D	Solos compostos principalmente de argilas (acima de 30%) ou solos com nível freático elevado, ou solos com camadas argilosas próximas à superfície, ou solos rasos sobre camadas impermeáveis	0,15 - 0,00

Fonte: Canholi (2005)

A determinação do CN é feita por meio da Tabela 2 que fornece valores de CN para os diferentes grupos hidrológico dos solos e respectivas condições de ocupação e uso do solo. Esses valores são referentes às condições médias (Condição II) de umidade antecedente. Para outras condições são realizadas correções aos valores tabelados para situações diferentes da média (Tabela 3).

Tabela 2 – Valores do parâmetro CN para a condição II de umidade antecedente do solo.

Utilização ou cobertura do solo		A	B	C	D
Zonas cultivadas:	sem conservação do solo	72	81	88	91
	com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições		68	79	86	89
Baldios em boas condições		39	61	74	80
Prado em boas condições		30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais	cobertura boa	45	66	77	83
	cobertura ruim	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições:					
	com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
	com relva em mais de 50 a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		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
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc		98	98	98	98
Arruamentos e estradas asfaltadas e com drenagem de águas pluviais		98	98	98	98
Paralelepípedos		76	85	89	91
Terra		72	82	87	89

Fonte: Tucci, (1993) apud Collischonn; Dornelles, (2013).

Tabela 3 – Correção dos valores de CN de acordo com a umidade antecedente.

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)

Esse método apresenta grande praticidade e aceitação, porém, tem sua concepção baseada em dados coletados para bacias hidrográficas dos Estados Unidos, em meados do século XX, com características específicas. Sendo assim, alguns estudos questionam a representatividade dos parâmetros pré-estabelecidos na metodologia original para bacias hidrográficas do território brasileiro.

Cunha et al. (2015) avaliaram e compararam a precipitação efetiva e os hidrogramas de cheia de projeto resultantes da aplicação da metodologia do SCS com eventos de chuva e vazão observados na bacia e verificaram que existe uma grande diferença percentual entre estes valores (Figura 1) e que o método do SCS tende a superestimar o volume escoado e as vazões de pico. Também consideraram valores de CN calibrados a partir de sua variação com a altura de chuva, que combinado com o hidrograma unitário médio da bacia, forneceu resultados mais próximos aos dados observados do que o método tradicional do SCS.

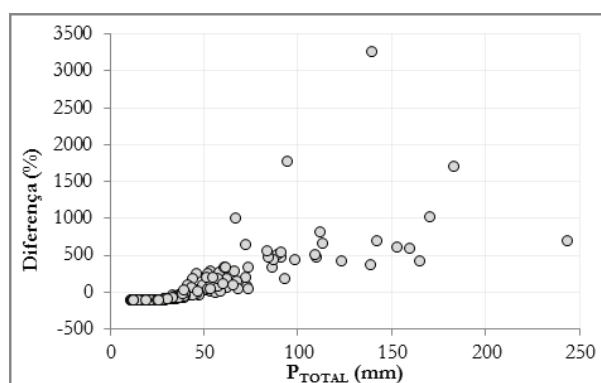


Figura 1 – Diferença percentual dos valores de precipitação excedente calculada em relação às observadas em função da magnitude do evento. Fonte: Cunha et al. (2015).

Tassi et al. (2006) também calibraram o CN através de um cálculo iterativo, em que a partir de dados observados de chuva e vazão foi feita a separação do escoamento superficial direto e de base, e com a equação do SCS foi determinada a precipitação efetiva, então foi feito o ajuste do CN para que ao final o volume total da precipitação calculada pelo método SCS fosse igual ao valor obtido pela separação do escoamento. E no geral, os valores de CN se apresentaram acima dos valores tabelados para a mesma bacia.

Assim como Cunha et al. (2015), Ajmal e Kim (2014) também defendem que os valores de CN calculados usando dados de precipitação-vazão variam com a magnitude de precipitação.

Outro parâmetro que tem sido objeto de estudo é o fator de perdas iniciais λ fixado em 0,20 pelo SCS na metodologia original. Segundo Ajmal e Kim (2014), esse valor é demasiadamente alto e deve ser calibrado a partir das medições de precipitação-vazão para uma melhor estimativa de escoamento. Ajmal e Kim (2014) buscaram determinar os parâmetros ótimos λ e CN para as bacias hidrográficas regionais e constataram que estes valores exibiram melhores resultados do que os valores fixos do modelo original do SCS-CN.

Além de Ajmal e Kim (2014), vários estudos recentes mostraram que o valor estabelecido para λ ($= 0,2$) é elevado, e que os valores entre 0,01 e 0,05 são mais realistas. Woodward et al. (2003) constataram que para os dados de precipitação e escoamento de 307 bacias dos EUA um valor de λ de cerca de 0,05 proporciona um melhor ajuste aos dados reais. Utilizando bacias em região semi-árida, Yuan et al. (2012) verificaram que variando o valor de λ de 0,01 a 0,53 (dependendo das características da bacia e do valor de precipitação), as estimativas de escoamento superficial melhoraram seus resultados.

2.4 Hidrograma unitário

2.4.1 Conceitos

Um hidrograma consiste em um gráfico da evolução da vazão ao longo do tempo que representa a resposta da bacia a uma dada precipitação. A teoria do Hidrograma Unitário (HU) foi proposta por Sherman (1932 apud SILVEIRA, 2016), como uma resposta da bacia hidrográfica a uma precipitação unitária excedente com duração específica. Para cada duração de chuva, o HU constitui uma característica própria da bacia, assumindo-se distribuição espacial e temporal uniforme da precipitação (dentro da duração (d)).

Com base no HU, uma vez que ocorra uma precipitação efetiva qualquer com mesma duração da chuva unitária, determina-se a resposta da bacia a essa precipitação (ou seja, o hidrograma resultante). Para isso, dois princípios fundamentam a teoria do HU, são eles: a proporcionalidade, em que qualquer precipitação de duração d gera um hidrograma de mesma duração do HU, mas com vazões proporcionais à precipitação (Figura 2 (a)); e a superposição, em que cada precipitação de duração d gera um hidrograma independente (deslocado no tempo conforme o instante em que ocorreu a precipitação), que são somados para obter o hidrograma total (Figura 2 (b)).

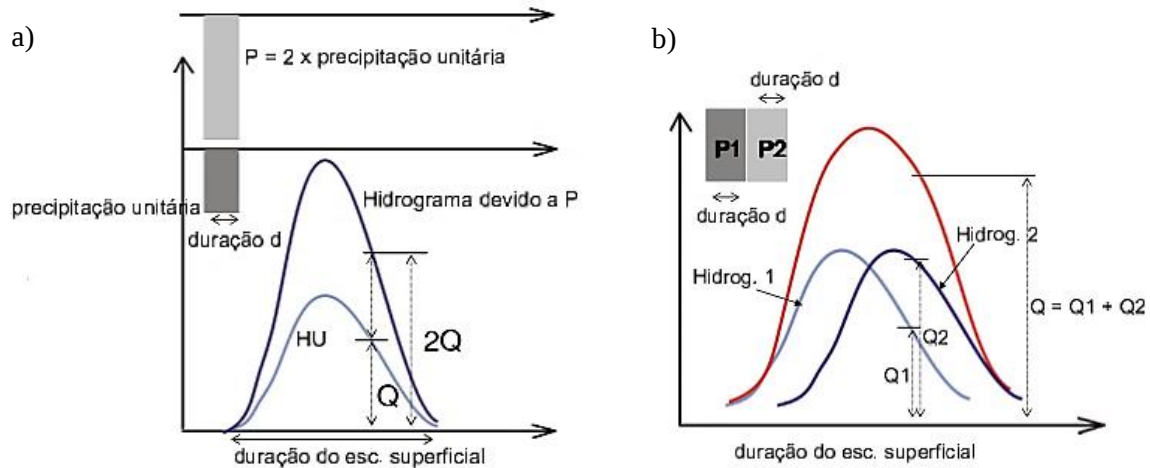


Figura 2 – (a) Princípio da proporcionalidade no conceito do HU. (b) Princípio da superposição no conceito do HU. Fonte: Paz (2004).

Além disso, é necessário realizar um processo conhecido como convolução. Esse processo consiste em:

- Calcular as ordenadas do hidrograma (as vazões propriamente ditas) referentes a cada precipitação individual em intervalos de tempo discretizados;
- Somar as ordenadas dos diversos hidrogramas nos intervalos de tempo correspondentes.

Supondo, por exemplo, que o HU gerou para um instante de tempo $t1$ uma vazão $Q1$, no tempo $t2$ uma vazão $Q2$, no tempo $t3$ uma vazão $Q3$ e no tempo $t4$ uma vazão $Q4$. E dado que ocorreu uma precipitação $P1$ no instante de tempo $t1$ e em seguida outra precipitação $P2$ no instante de tempo $t2$, o hidrograma resultante total calculado pelo processo de convolução é representado na Tabela 4.

Tabela 4 – Processo de convolução na teoria do hidrograma unitário.

t	Q(P1)	Q(P2)	Qttotal = Q(P1) + Q(P2)
t1	$Q1 \times P1$		$Q1 \times P1$
t2	$Q2 \times P1$	$Q1 \times P2$	$Q1 \times P1 + Q1 \times P2$
t3	$Q3 \times P1$	$Q2 \times P2$	$Q3 \times P1 + Q2 \times P2$
t4	$Q4 \times P1$	$Q3 \times P2$	$Q4 \times P1 + Q3 \times P2$
		$Q4 \times P2$	$Q4 \times P2$

A determinação do HU é considerada ideal quando ocorre a partir de dados observados na bacia (dados de precipitação e vazão, selecionados por eventos), porém, na prática, isso pouco ocorre pela falta desses dados. Neste caso, pode-se determinar o

hidrograma de projeto de uma bacia hidrográfica de forma indireta, com o auxílio de métodos ditos sintéticos. Snyder (1938 apud SILVEIRA, 2016) introduziu o conceito de Hidrograma Unitário Sintético (HUS) em que o HU é determinado em função das características físicas da bacia ou características do hidrograma e com o auxílio de equações empíricas.

2.4.2 HU sintético SCS

O método do HU sintético do SCS foi desenvolvido por Victor Mockus em 1957 com base em hidrogramas unitários de um grande número de bacias hidrográficas instrumentadas dos Estados Unidos (USDA, 2007). Analisando grande número de hidrogramas unitários naturais em função do tempo de pico e de base, o SCS apresentou um método para hidrograma unitário sintético que tem como resultado um hidrograma em forma triangular e adimensional cuja área do triângulo corresponde ao volume precipitado (Figura 3), ficando conhecido como hidrograma unitário sintético triangular.

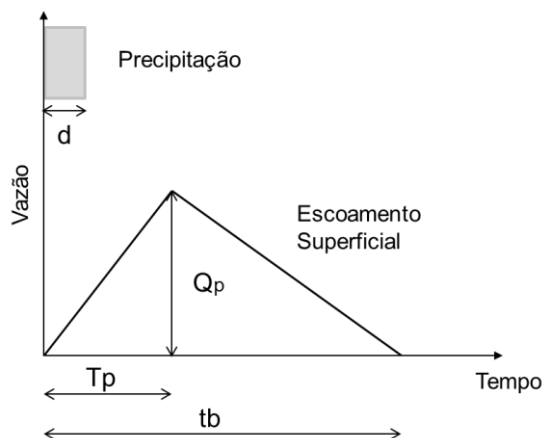


Figura 3 – Hidrograma Unitário Sintético do SCS. Fonte: Adaptado de Paz (2004).

O HU sintético do SCS é determinado em função das características físicas da bacia e do tempo de concentração, sua vazão de pico, tempo de pico e tempo de base apresentados na Figura 3 são estimados através de equações empíricas (Equações 4, 5 e 6).

$$T_p = \frac{d}{2} + 0,6 \times T_c \quad (4)$$

$$t_b = 2,67 \times T_p \quad (5)$$

$$Q_p = 0,208 \times \frac{A}{T_p} \quad (6)$$

Sendo, T_p o tempo de pico (h); d é a duração da precipitação (h); T_c é o tempo de concentração da bacia (h); t_b é o tempo de base do hidrograma (h); Q_p é a vazão de pico do hidrograma (m^3/s); A é a área da bacia (km^2).

Para encontrar o hidrograma resultante de uma bacia hidrográfica para determinado evento chuvoso primeiramente é determinado o HU da bacia, para isso é preciso escolher a duração do intervalo de discretização do hidrograma unitário, que deve ter a mesma duração d da precipitação excedente unitária e dos intervalos de tempo sobre os quais a precipitação foi dividida (Figura 4)

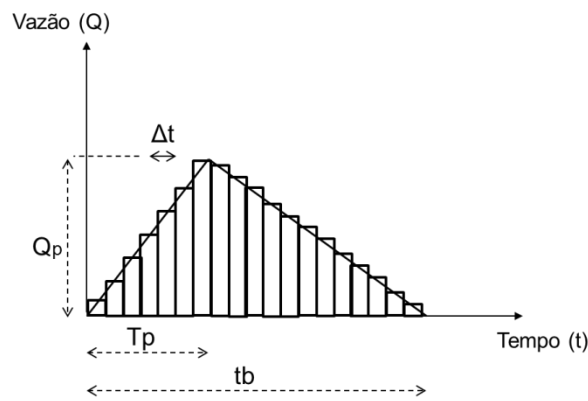


Figura 4 – Discretização Hidrograma Unitário Sintético do SCS.

Para obter o HU triangular deve-se calcular a vazão $Q(t)$ correspondente no hidrograma unitário, para cada intervalo de duração d , por meio da Equação 7.

$$Q(t) = \frac{Q_p}{T_p} \times t \quad \text{para } t \leq T_p \quad (7)$$

$$Q(t) = Q_p \times \frac{t_b - t}{t_b - T_p} \quad \text{para } t > T_p$$

Sendo, $Q(t)$ a vazão no tempo t (m^3/s); T_p é o tempo de pico (min); t_b é o tempo de base (min), e t é o instante de tempo para o qual se deseja estimar a vazão do HU (min).

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

O uso do hidrograma unitário sintético do SCS é recomendado para bacias hidrográficas com área na faixa de $3 km^2$ a $250 km^2$ (TOMAZ, 2012). A limitação do uso

desta metodologia para bacias hidrográficas mais extensas está provavelmente associada à hipótese que supõe que durante a precipitação efetiva de duração unitária a precipitação é uniformemente distribuída sob a área das bacias.

Assim como o método SCS-CN, o método do HUS do SCS tem suas origens em dados de bacias hidrográficas norte-americanas e sua aplicabilidade é questionada em diversos trabalhos de cunho científico. Para aplicar o método são utilizadas várias equações empíricas (descritas acima), e os parâmetros utilizados nessas equações são questionados por vários autores.

Tucci (2003) apresentou relações para obtenção destes parâmetros (vazão de pico, tempo de concentração e tempo de pico) com base em dados de bacias brasileiras. A estimativa dos valores foi obtida relacionando os tempos de pico e concentração, para as bacias utilizadas no estudo. O fator T_p variou entre 0,39 e 0,49, com grande frequência para 0,45 ($T_p = 0,45T_c$). No método SCS é adotado $T_p = 0,60T_c$, que é muito alto.

Silveira (2016) também questiona as relações empíricas estabelecidas entre os parâmetros usados no método SCS-HUS e diretamente associados com o fator T_p , neste trabalho também se conclui que o valor 0,60 é alto para as bacias analisadas.

3. METODOLOGIA

3.1 Área de estudo e dados disponíveis

Toma-se como área de estudo para esse trabalho a bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio, localizada na região Metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul (Figura 5).



Figura 5 – Localização da bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio. Fonte: Adaptado de Tassi et al. (2006).

A bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio apresenta uma área de drenagem de aproximadamente 80 km². O curso principal da bacia é o Arroio Dilúvio com extensão em torno de 12 km, sua nascente está localizada na cidade de Viamão e desagua no Lago Guaíba, apresentando grande importância na drenagem da cidade de Porto Alegre (ALVES, 2004).

Devido ao processo de urbanização da bacia e às cheias que são naturalmente frequentes nessa região, a cidade de Porto Alegre, durante o período de 1930 a 1980, realizou a canalização do seu principal riacho que a partir de então ficou conhecido como Arroio Dilúvio, possibilitando o desenvolvimento urbano com menos riscos de inundações (MOG; CAMPOS; PICCININI, 2014).

A bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio foi escolhida para esse estudo em razão da disponibilidade de dados observados de chuva-vazão. Durante os anos de 1978 a 1982 a bacia hidrográfica foi monitorada por 11 linígrafos e 14 pluviógrafos (Figura 6). Os aparelhos coletavam informações a cada 30 minutos e tinham uma autonomia semanal. Todas as informações coletadas foram digitalizadas e registradas em planilhas de papel. Porém, existem algumas incoerências ou falhas nos dados, devido algumas panes ou contratempos nos postos, sendo, portanto, parte das séries preenchidas por técnicas simples de preenchimentos de falhas (Silveira, 2000).

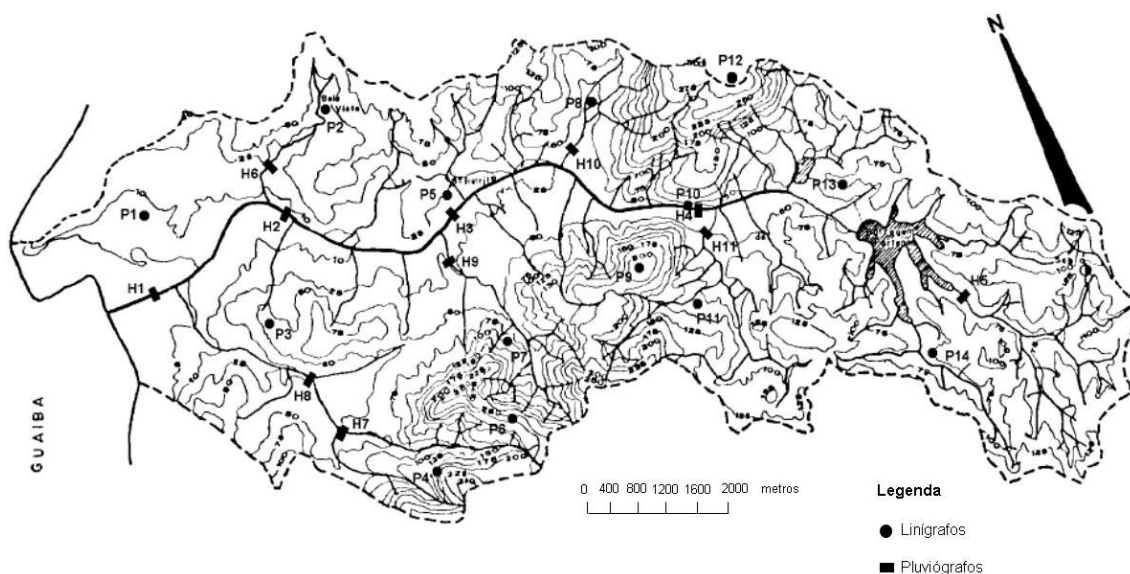


Figura 6 – Localização da rede de monitoramento hidrológico. Fonte: Silveira (2000).

Esse estudo concentra-se mais especificamente na sub-bacia hidrográfica Cascata I que pertence à bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio e ocupa uma área de aproximadamente 4,98 km². Sua localização também está apresentada na Figura 5.

Para elaboração da dissertação de Costa (2017), que se encontra em andamento, a sub-bacia hidrográfica Cascata I foi caracterizada em relação ao uso e ocupação do solo, tipo de solo e topografia. Através do modelo digital de elevação (MDE) proveniente dos dados do USGS-SRTM com resolução espacial de aproximadamente 30 m, são determinadas as cotas topográficas e obtida a rede de drenagem (Figura 7). As maiores cotas (em torno de 250 metros) se concentram na região leste da sub-bacia.

O mapa de uso e ocupação do solo (Figura 8) foi elaborado através de imagens provenientes do satélite Landsat-5 referente ao mês de agosto de 1987, utilizando a classificação por Máxima Verossimilhança. A sub-bacia apresenta quatro classificações quanto ao uso do solo: Corpos hídricos, Vegetação, Área urbana e Solo exposto.

Quanto aos tipos de solos, são encontrados na sub-bacia hidrográfica: Associação de cambissolos háplicos com neossolos litólicos ou neossolos regolíticos e associação de argissolos vermelhos ou argissolos vermelho-amarelos com cambissolos háplico (HASENACK; WEBER; MARCUZZO, 2008).

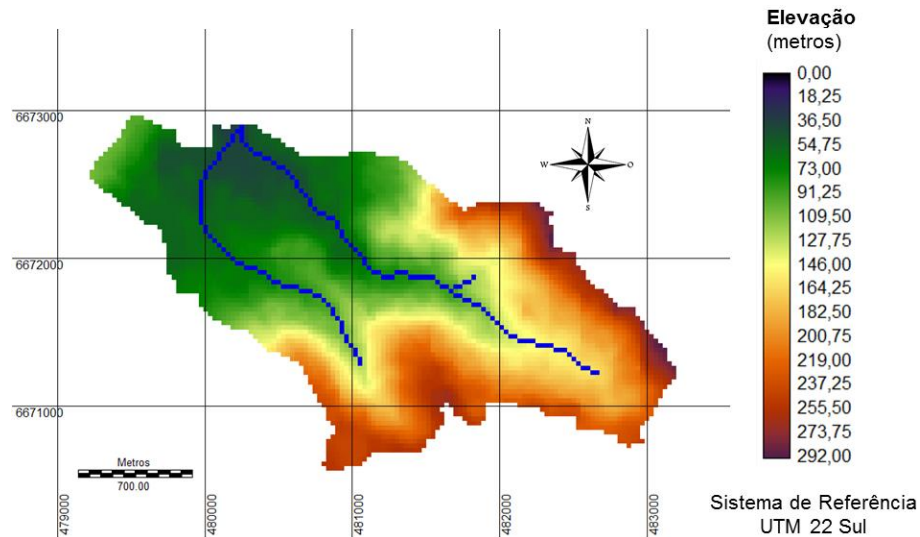


Figura 7 – Modelo digital de elevação da sub-bacia hidrográfica Cascata I e sua respectiva rede de drenagem. Fonte: Costa (2017).

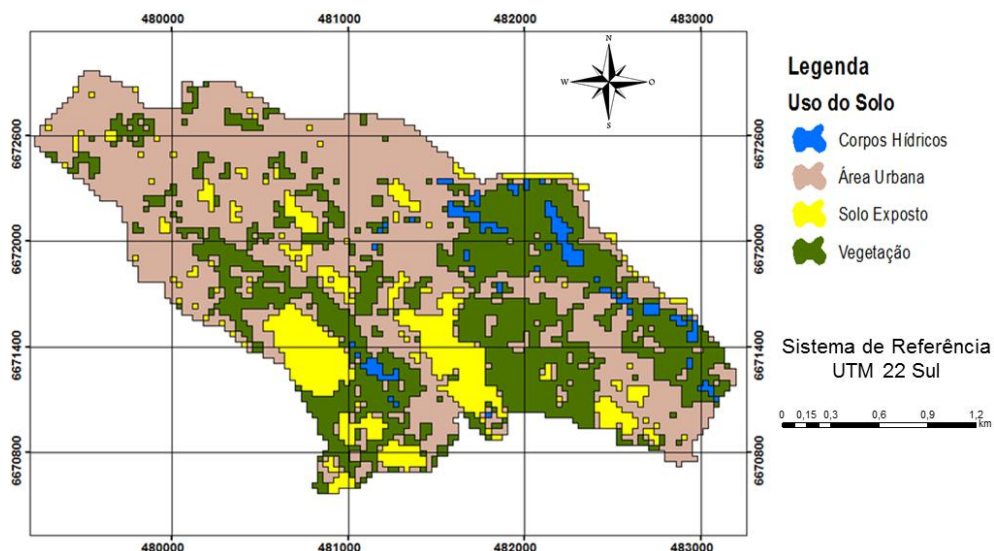


Figura 8 – Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia hidrográfica Cascata I. Fonte: Costa (2017).

3.2 Visão geral

As etapas constituintes da metodologia utilizada nesse trabalho estão apresentadas no fluxograma abaixo (Figura 9) e são explicadas detalhadamente nos próximos itens.

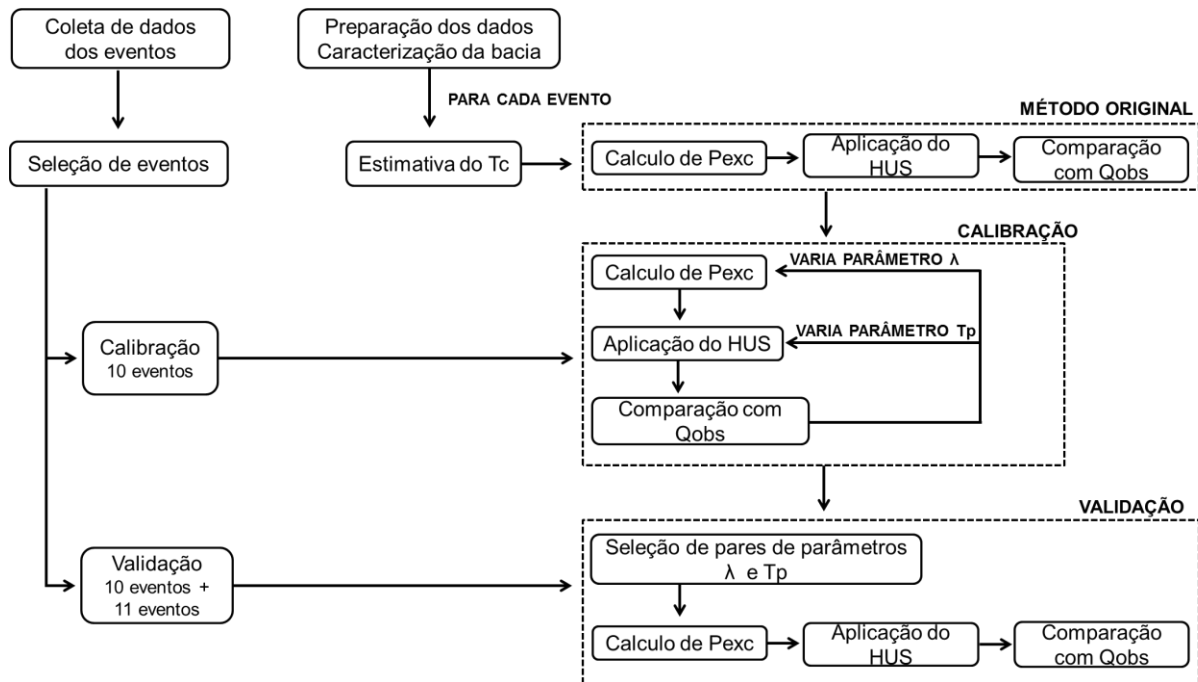


Figura 9 – Fluxograma da metodologia utilizada nesse trabalho.

3.3 Seleção de eventos

Dentre os vários eventos observados de chuva e vazão disponíveis para a sub-bacia hidrográfica Cascata I, 21 eventos foram selecionados e estão apresentados na Tabela 5.

Nessa tabela estão exibidas a identificação dos eventos e suas correspondentes datas de ocorrência. Também são apresentadas características desses eventos como precipitação total; duração da precipitação; intensidade média da precipitação (determinada pelo quociente entre a precipitação total e a duração total da precipitação); intensidade máxima da precipitação (representada pela razão entre a precipitação máxima dentre uma sequência de registros e o intervalo de tempo de um registro); precipitação efetiva; vazão de pico; tempo de pico; coeficiente de escoamento superficial (razão entre a precipitação efetiva e a precipitação total); e o coeficiente de escoamento global (dado pela razão entre o volume de água que escoou superficialmente e o volume de água que infiltra).

Esses eventos foram escolhidos por apresentarem formato simples, com características em comum visualmente com o evento ilustrado na Figura 10, gerando um hidrograma de forma triangular. Pois, os métodos mais simples de separação do escoamento superficial e subterrâneo e o método do HU triangular sintético do SCS – ambos utilizados nesse trabalho – necessitam desse formato, como é visto mais adiante.

Tabela 5 – Característica dos eventos selecionados da sub-bacia hidrográfica Cascata I.

Evento ID	Data	Precipitação					Escoamento			
		P_{total} (mm)	D_{chuva} (h)	$I_{méd}$ (mm/h)	$I_{máx}$ (mm/h)	P_{ef} (mm)	Q_p (m ³ /s)	T_p (dt)	$C_{superficial}$	C_{global}
070279	07/02/1979	18.66	3.00	6.22	21.44	4.89	3.34	7.00	0.26	0.32
050479	05/04/1979	7.02	2.00	3.51	8.00	1.16	0.89	7.00	0.16	0.29
290479	29/04/1979	26.75	5.00	5.35	21.92	1.80	1.79	14.00	0.07	0.09
250879	25/08/1979	12.20	1.50	8.13	18.80	1.64	1.42	5.00	0.13	0.20
240979	24/09/1979	12.60	1.00	12.60	22.00	1.09	0.99	4.00	0.09	0.10
250979	25/09/1979	39.60	4.00	9.90	24.80	5.26	3.65	7.00	0.13	0.16
171179	17/11/1979	28.53	5.00	5.71	18.28	4.14	2.56	10.00	0.15	0.18
061279 ^a	06/12/1979	7.54	2.00	3.77	8.28	0.54	0.49	10.00	0.07	0.10
061279 ^b	06/12/1979	14.02	3.00	4.67	17.20	1.55	1.71	7.00	0.11	0.12
081279	08/12/1979	14.40	1.50	9.60	27.24	2.10	1.49	8.00	0.15	0.16
121279	12/12/1979	52.84	2.50	21.14	88.28	7.64	7.48	5.00	0.14	0.19
090180	09/01/1980	13.03	2.50	5.21	24.00	3.20	3.13	8.00	0.25	0.33
050280	05/02/1980	11.50	1.00	11.50	21.00	2.35	2.88	5.00	0.20	0.28
160280	16/02/1980	21.51	4.00	5.38	27.00	5.38	5.31	5.00	0.25	0.33
240280	24/02/1980	13.01	3.50	3.72	18.00	2.57	2.54	5.00	0.20	0.26
110380	11/03/1980	12.61	2.00	6.31	21.60	1.83	1.97	5.00	0.14	0.19
250380	25/03/1980	17.25	1.50	11.50	34.16	2.77	2.70	5.00	0.16	0.23
310580	31/05/1980	27.34	1.50	18.23	47.68	4.05	4.00	4.00	0.15	0.20
300680	30/06/1980	11.40	2.50	4.56	11.20	0.79	0.61	4.00	0.07	0.10
170880	17/08/1980	28.02	3.00	9.34	21.52	7.48	3.75	7.00	0.27	0.32
310880	31/08/1980	17.62	4.00	4.41	10.60	2.32	1.92	7.00	0.13	0.19

Legenda: ID do evento = Identificação do evento; P_{total} = Precipitação total; D_{chuva} = Duração da chuva; $I_{méd}$ = Intensidade média da chuva; $I_{máx}$ = Intensidade máxima da chuva; 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: Adaptado de Costa (2017)

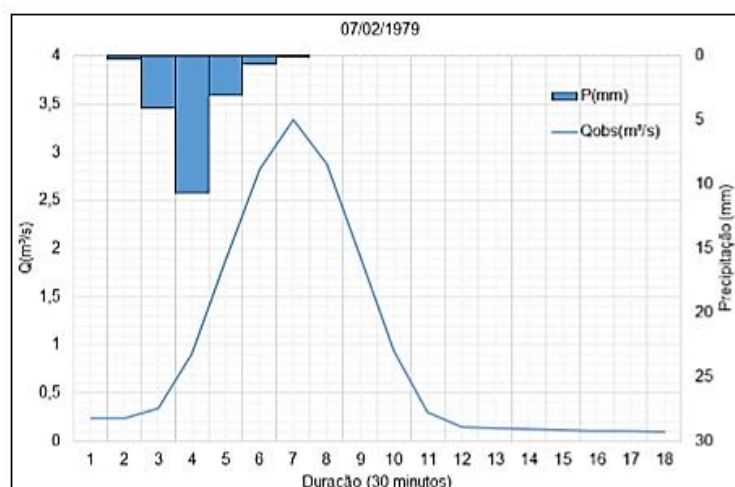


Figura 10 – Exemplo de evento utilizado no estudo. Fonte: Costa (2017).

Para a etapa de calibração foram selecionados 10 eventos de forma aleatória, foram eles os eventos de: 05/04/79, 25/08/79, 25/09/79, 17/11/79, 12/12/79, 09/01/80, 16/02/80, 25/03/80, 31/05/80, 30/06/80. Os demais 11 eventos, juntamente com os mesmos 10 eventos da calibração, foram utilizados para a validação da calibração dos parâmetros.

3.4 Cálculo do tempo de concentração

Um parâmetro muito importante no estudo do comportamento hidrológico de uma bacia que pode ser utilizado para estimar a transformação chuva-vazão é o tempo de concentração (T_c). Esse parâmetro é definido como o tempo necessário para que toda a bacia esteja contribuindo na seção do exutório (Silveira, 2005). Portanto, para determinar o T_c é essencial identificar os pontos mais distantes do exutório ou que proporcionem os maiores tempos de deslocamento ao longo da sub-bacia e traçar o possível percurso que a água faria até chegar ao rio com auxílio do MDE, como mostrado no exemplo da Figura 11.

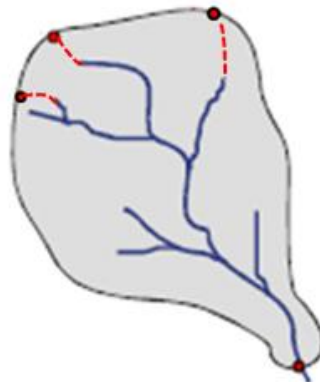


Figura 11 – Exemplo de traçado do percurso da água para cálculo do T_c .

Para esse trabalho foi utilizado o método proposto pelo SCS (USDA, 1986). A metodologia utiliza dois tipos de equação para calcular o tempo de deslocamento do escoamento, uma para escoamento superficial e outra para escoamento em canal, de acordo com a característica do local onde está sendo feito o cálculo. Quando se tratarem de vários trechos de drenagem deve ser calculado um T_c para cada trecho, e o T_c total será dado pela soma dos T_c individuais (PORTO ALEGRE, 2005).

Para o cálculo do tempo de deslocamento do tipo escoamento superficial é utilizada a Equação 8:

$$T_c = \frac{5,474 \times (\eta \times L)^{0,8}}{P_{24}^{0,5} \times S^{0,4}} \quad (8)$$

Sendo, T_c o tempo de concentração dado em minutos; S corresponde à declividade (m/m); η é o coeficiente de rugosidade de Manning (valor tabelado para diferentes superfícies); L é o comprimento ao longo do escoamento (m); P_{24} representa uma lâmina de precipitação com 24 horas de duração (mm).

O P_{24} é determinado através da IDF (curva de intensidade-duração-frequência) da área de estudo. O Manual de Drenagem Urbana de Porto Alegre apresenta diferentes curvas IDF, uma para cada região da cidade, a Equação 9 representa a curva IDF recomendada para o local da bacia de estudo (PORTO ALEGRE, 2005).

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

Onde, i é a intensidade da precipitação (mm/h); d é a duração da precipitação (min); Tr é o período de retorno (anos).

Dado que:

$$i(\text{méd}) = \frac{P \text{ total}}{d} \quad (10)$$

Sendo, $i(\text{méd})$ a intensidade média da precipitação (mm/h); $P \text{ total}$ é a precipitação total (mm).

O período de retorno, que é o tempo necessário para que um evento ocorra novamente ou seja superado, foi determinado para cada evento a partir da Equação 9, utilizando os dados disponíveis de precipitação total e duração da precipitação, encontrando-se o valor da intensidade (Equação 10) e posteriormente o valor do Tr . Para esse trabalho, foi considerado o período de retorno mínimo de 2 anos, apenas o evento de 12/12/1979 apresentou Tr maior que o mínimo, de aproximadamente 3 anos.

Depois de encontrado o Tr é possível determinar a intensidade de uma precipitação com 24 horas de duração e em seguida obtém-se o P_{24} .

Os trechos que compõem o caminho de fluxo até a rede de drenagem foram caracterizados quanto à extensão, declividade e tipo de uso do solo para o emprego da Equação 8. Para o cálculo da extensão do trecho, as distâncias foram determinadas a partir do possível caminho d'água e contabilizadas considerando o comprimento em linha reta em cada trecho com o mesmo uso do solo. A declividade foi determinada pela divisão entre a diferença de cotas dos pixels final e inicial do trecho pela distância do trecho.

O tipo de uso do solo foi identificado a partir do mapa correspondente, sendo atribuído um valor de rugosidade de Manning conforme estudo realizado por Canholi (2005) (Tabela 6).

Tabela 6 – Valores do coeficiente de Manning para sub-bacia Cascata I.

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: Canholi (2005).

Para o escoamento concentrado de pequena lâmina, canais e redes de drenagem, o procedimento consiste na aplicação da equação de Manning (Equações 11 e 12) para estimativa da velocidade de escoamento.

$$V = \frac{Rh^{2/3} \times S^{1/2}}{\eta} \quad (11)$$

$$Rh = \frac{A}{P_m} \quad (12)$$

Sendo, V a velocidade do escoamento dada em m/s; S é a declividade do fundo (m/m); Rh é o raio hidráulico (m); A é a área molhada da seção transversal (m²) e P_m é o perímetro molhado da seção transversal (m).

E posteriormente determina-se o tempo de concentração (Equação 13):

$$T_c = \frac{L}{V} \quad (13)$$

Sendo, o T_c dado em segundos.

Para cálculo do tempo de deslocamento no canal, primeiramente foi feita a divisão do rio em diferentes classes, de acordo com suas características. Os trechos e sub-trechos de rios da sub-bacia hidrográfica Cascata I foram divididos em 15 classes, de acordo com as características apresentadas na Figura 12.

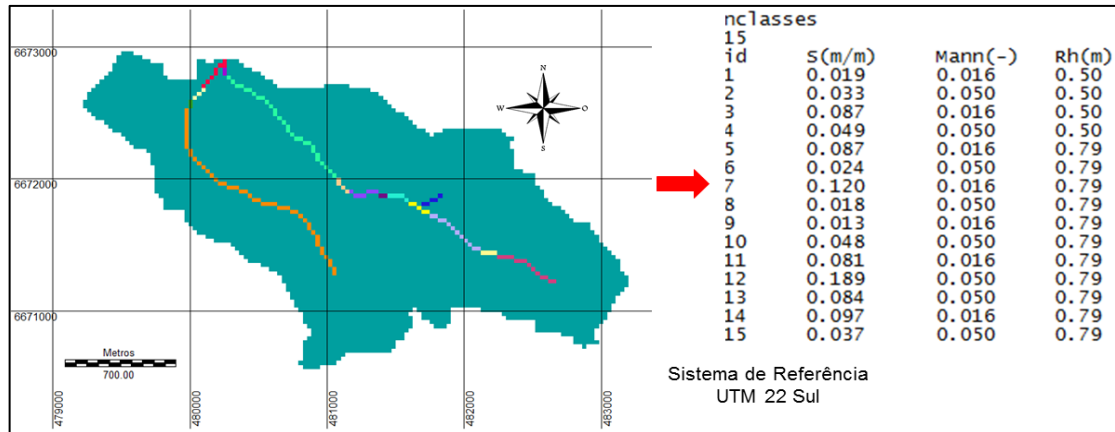


Figura 12 – Divisão em classes dos trechos e sub-trechos dos rios da sub-bacia hidrográfica Cascata I.
Fonte: Costa (2017).

Em virtude da ausência de informações disponíveis referentes às características dos canais da época dos dados observados de chuva-vazão, foram utilizadas as dimensões (largura e altura) dos canais artificiais do Plano diretor de drenagem urbana de Porto Alegre e estimou-se o valor do raio hidráulico em cada trecho, aplicando a Equação 14.

$$Rh = \frac{\left(b + \left(\frac{1}{m} \times h\right)\right) \times h}{b + 2h \times \left(\sqrt{1 + \left(\frac{1}{m}\right)^2}\right)} \quad (14)$$

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

Sabe-se que na época da década de 70 e 80 os canais não eram totalmente naturais, em alguns pontos já existiam canais artificiais, então os trechos a montante e jusante de canais artificiais foram considerados como canais naturais, levando-se em conta as mesmas dimensões dos canais artificiais e atribuindo valores de coeficiente de manning recomendados para canais naturais. Os valores de manning utilizados estão descritos na Tabela 2.

Os valores das declividades em cada trecho foram obtidos pela diferença do valor de elevação e o comprimento correspondente. Lembrando que os valores das elevações foram obtidos a partir do modelo digital de elevação e considerando os valores de comprimentos em linha reta.

Para o cálculo do tempo deslocamento total, percorre-se o caminho de fluxo desde a cabeceira até o exutório. Ao longo desse caminho, são encontrados trechos em superfície e em canal. São então somados os tempos de deslocamentos para cada trecho (e subtrechos) em superfície com os trechos em canais.

3.5 Separação do escoamento superficial e subterrâneo

Para melhor entendimento do comportamento da bacia hidrográfica em relação a um determinado evento hidrológico é necessário realizar a separação do escoamento superficial (escoamento direto) do escoamento subterrâneo (escoamento de base). Pois, parte da precipitação infiltra ao longo das camadas do solo e subsolo, contribuindo para o escoamento subterrâneo e outra parte escoam superficialmente no solo.

Existem vários métodos para realizar essa separação. Entre as abordagens mais simples existentes, 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 13). Para determinar o ponto C, foi utilizado para esse estudo, o método que 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 e os pontos A e C são ligados por um segmento de reta.

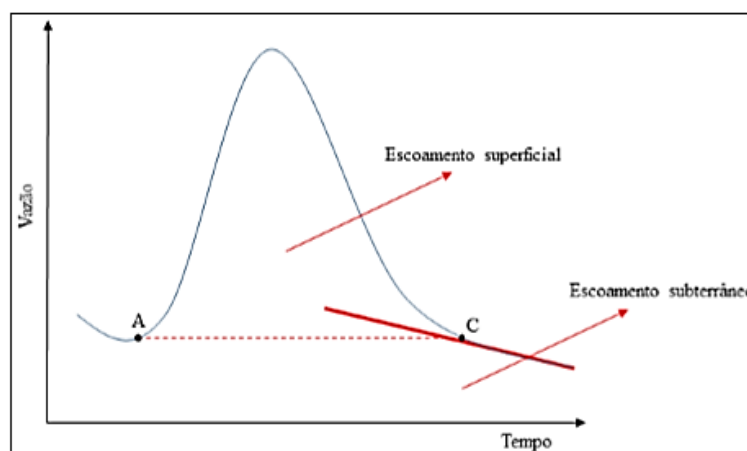


Figura 13 – Esquema representativo de obtenção do escoamento superficial. Fonte: Costa (2017).

A partir dos dados observados de precipitação e vazão e com auxílio de uma rotina computacional desenvolvida por Costa (2017) em linguagem MatLab, é possível determinar o instante em que ocorre o início do escoamento superficial, e o momento em que cessa o escoamento superficial. Por meio da equação da reta, é calculada a vazão de base e por subtração encontra-se a vazão que escoou superficialmente. Para esse trabalho interessa apenas a vazão referente ao escoamento superficial.

3.6 Transformação chuva-vazão pelo método SCS-CN-HUS

3.6.1 Aplicação do método SCS-CN

Para determinar a precipitação excedente foi utilizado o método SCS-CN e para isso foi feita a classificação dos tipos de solo encontrados na sub-bacia Cascata I, de acordo com os grupos hidrológicos de solos considerados no método. Essa classificação foi feita com base no trabalho de Sartori et al. (2005), que relaciona os tipos de solos brasileiros com os grupos hidrológicos do método SCS. A sub-bacia Cascata I apresenta dois tipos de solo que correspondem aos grupos hidrológicos C e D.

Devido à falta de informações dos eventos ocorridos nos últimos 5 dias que antecede o evento, como o modelo recomenda, foi adotada a condição II (condição média). Considerando os tipos de solo, o uso do solo e as condições de umidade, é feita a determinação do parâmetro CN, de acordo com a Tabela 2.

Como a bacia apresenta diferentes tipos de solos e ocupações, foi calculado um CN para cada combinação entre uso do solo e tipo de solo. Em seguida foi calculado um CN médio (CNmed) ponderado pelos CNs de cada combinação em função da área – como mostra a Tabela 7.

A Figura 14 apresenta os diferentes CNs encontrados ao longo da sub-bacia hidrográfica.

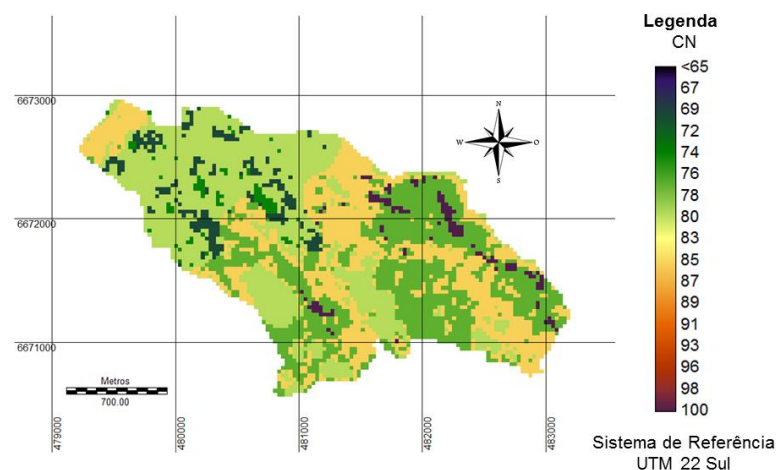


Figura 14 – Mapa de CNs da sub-bacia hidrográfica Cascata I. Fonte: Costa (2017).

Tabela 7 – Valores de CNs e as áreas correspondentes que ocupam.

Uso e ocupação 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
Corpos 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: Costa (2017)

O CNmed ponderado é de 81 e partir deste valor encontra-se o armazenamento máximo (S) da bacia a partir da Equação 3 desenvolvida pelo método SCS. A partir dessas informações calcula-se a precipitação excedente total para cada intervalo de tempo, através da Equação 1 se obtém a distribuição temporal da precipitação excedente.

3.6.2 Aplicação do método SCS-HUS

Conhecendo o tempo de concentração e utilizando equações empíricas do método do hidrograma unitário sintético do SCS é possível encontrar o hidrograma unitário (HU) para cada evento utilizado nessa pesquisa. Foi adotada uma discretização do HU de 30 minutos. Usando o HU e a precipitação excedente de cada evento encontrou-se o hidrograma resultante para os respectivos eventos.

A aplicação do método SCS-CN e SCS-HUS para os 21 eventos foi viabilizada pelo desenvolvimento de uma rotina na linguagem MatLab, que calcula a precipitação excedente e a partir disso aplica o hidrograma unitário sintético. Essa rotina também foi desenvolvida por Costa (2017).

3.6.3 Calibração de parâmetros

Para esse trabalho, foram calibrados dois parâmetros: o fator de perdas iniciais (λ) e o fator tempo de pico (T_p). As perdas iniciais (I_a) são utilizadas para calcular a precipitação efetiva, nesse trabalho, buscou-se calibrar o valor $\lambda = 0,20$. O fator T_p , está presente nas equações empíricas para cálculo do HUS e é representado pela relação $0,60T_c$, também se buscou calibrar o valor 0,60.

Foi realizado o ajuste desses parâmetros para avaliar a influência que cada um exerce nas vazões geradas pelo modelo em relação às vazões observadas. Para isso, foi necessário estabelecer uma faixa de valores para variar esses parâmetros. Procurou-se utilizar valores em torno de 0,20 para λ e 0,60 para o fator T_p . Desta forma, foi definida uma faixa de valores para o fator perdas iniciais que alternou de 0,01 até 0,40, com intervalos variando de 0,01, totalizando 40 valores. Para o fator de tempo de pico, outra faixa de valores foi considerada, compreendendo valores de 0,01 até 0,65, com intervalos variando inicialmente de 0,05 e conforme a necessidade para cada evento os intervalos foram restringidos a 0,01.

Foram produzidas centenas de hidrogramas combinando os vários valores estabelecidos para λ e fator T_p , para cada evento da calibração. Os melhores parâmetros foram escolhidos através de uma análise visual dos gráficos produzidos comparados com os hidrogramas observados. Os pares de parâmetros que proporcionaram uma maior aproximação entre os dados observados e os valores calculados são escolhidos (um ou mais de um par) para ser utilizado na aplicação do método aos eventos reservados para validação e para recalcular os eventos da calibração.

Para comparação dos resultados obtidos por cada evento, calculou-se a diferença dos valores estimados de volume (ΔV), tempo de pico (ΔT_p) e vazão de pico (ΔQ_p), em relação aos observados. O volume é calculado pela Equação 15. O tempo de pico e vazão de pico são indicados visualmente através do hidrograma. A precipitação efetiva também foi calculada utilizando o método SCS-CN com diferentes valores de λ e comparada com a observada.

$$\sum V = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n) \cdot \Delta t \quad (15)$$

Sendo, $\sum V$ o volume total (m^3); Q são as vazões do hidrograma (m^3/s); Δt é o intervalo de tempo (s).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Abordagem original SCS-CN-HUS

Neste trabalho foi calculado o hidrograma, através da abordagem tradicional do método SCS-CN-HUS (utilizando o fator T_p 0,60 e o fator de perdas iniciais 0,20) para os 21 eventos selecionados. Em cada gráfico são comparados o hidrograma calculado com o hidrograma observado obtido através dos dados disponíveis (Figura 15).

Percebe-se visualmente que os hidrogramas calculados não representam satisfatoriamente a transformação chuva-vazão a partir dos dados de precipitação observados, usando o método SCS-CN-HUS. Para uma análise mais detalhada da diferença entre os hidrogramas calculados e observados, foram calculadas as diferenças de volume (V), tempo de pico (T_p) e vazão de pico (Q_p) (Tabela 8).

Observa-se que para vários eventos o escoamento é nulo ou quase nulo quando submetido aos valores da metodologia original, apenas três eventos apresentam volume escoado calculado maior do que o volume observado. Ficando pressuposto que as perdas iniciais consideradas no cálculo são maiores do que as reais, ou seja, o valor do fator de perdas iniciais deve ser menor que 0,20.

O tempo de pico se encontra deslocado com diferença de pelo menos 3 intervalos de tempo para a maioria dos eventos e o tempo de base é visivelmente desajustado em relação ao hidrograma observado. A vazão de pico é consideravelmente inferior para todos os eventos. Dessa forma, uma vez que o fator tempo de pico ($= 0,60$) influencia diretamente nos valores de T_p , t_b e Q_p (Equações 4, 5, 6), também se conclui que o valor do fator T_p não é o melhor para essa sub-bacia.

Também foram calculados esses erros na forma relativa, em percentual (Figura 16). Pelo gráfico pode-se observar que em relação às três variáveis muitos eventos apresentam erro de 100% e negativo, isso se deve ao escoamento nulo ou quase nulo gerado para vários eventos, ou seja, a maioria dos eventos foi subestimada.

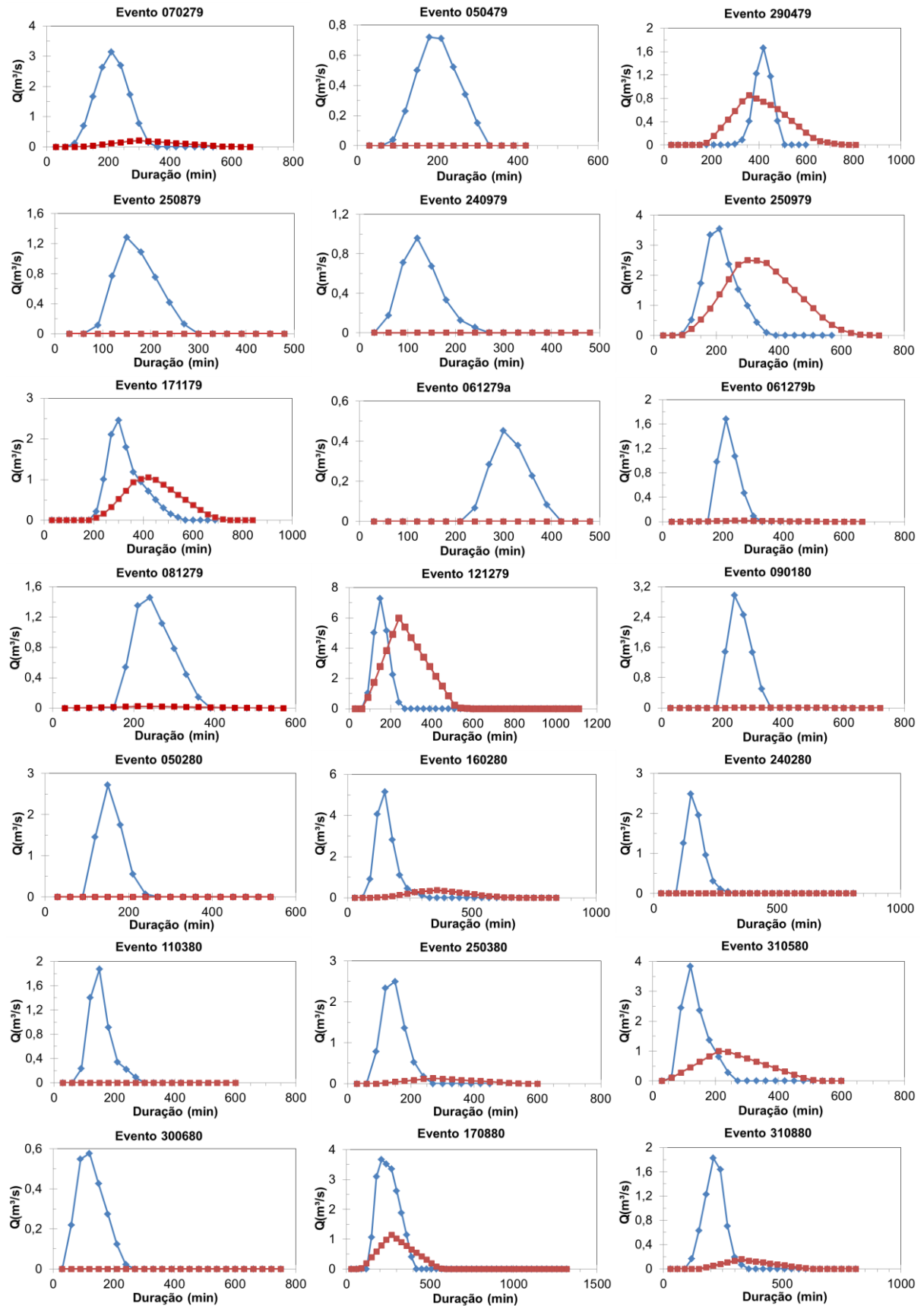
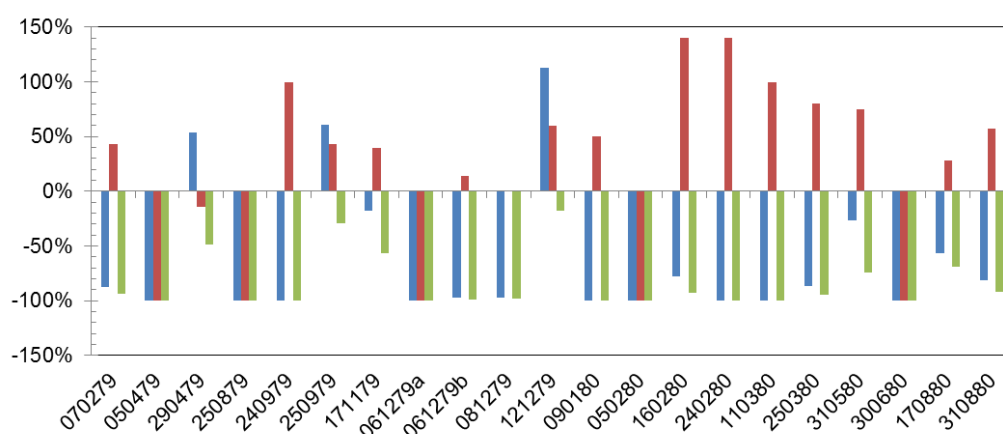


Figura 15 – Comparação entre o hidrograma observado (em azul) e o hidrograma calculado (em vermelho).

Tabela 8 – Comparação dos valores observados e calculados pelo método original.

Evento ID	V_{obs} (m ³)	V_{cal} (m ³)	ΔV (m ³)	Tp_{obs} (min)	Tp_{cal} (min)	ΔTp (min)	Qp_{obs} (m ³ /s)	Qp_{cal} (m ³ /s)	ΔQp (m ³ /s)
070279	24.417	2.991	-21.426	210	300	90	3,15	0,21	-2,94
050479	5.776	0	-5.776	180	-	-180	0,72	0,00	-0,72
290479	8.973	13.795	4.822	420	360	-60	1,66	0,85	-0,81
250879	8.163	0	-8.163	150	-	-150	1,28	0,00	-1,28
240979	5.463	7	-5.456	120	240	120	0,96	0,00	-0,96
250979	26.226	42.113	15.887	210	300	90	3,54	2,50	-1,04
171179	20.683	17.005	-3.679	300	420	120	2,46	1,06	-1,40
061279a	2.682	0	-2.682	300	-	-300	0,45	0,00	-0,45
061279b	7.722	235	-7.487	210	240	30	1,68	0,02	-1,66
081279	10.485	348	-10.137	240	240	0	1,46	0,02	-1,44
121279	38.142	81.258	43.116	150	240	90	7,28	5,98	-1,30
090180	15.984	43	-15.941	240	360	120	2,97	0,00	-2,97
050280	11.745	0	-11.745	150	-	-150	2,71	0,00	-2,71
160280	26.838	6.020	-20.818	150	360	210	5,15	0,37	-4,78
240280	12.807	41	-12.766	150	360	210	2,48	0,00	-2,48
110380	9.108	8	-9.100	150	300	150	1,87	0,00	-1,87
250380	13.824	1.851	-11.973	150	270	120	2,50	0,13	-2,37
310580	20.214	14.830	-5.384	120	210	90	3,84	1,01	-2,83
300680	3.933	0	-3.933	120	-	-120	0,57	0,00	-0,57
170880	37.305	16.058	-21.247	210	270	60	3,67	1,14	-2,53
310880	11.592	2.126	-9.466	210	330	120	1,82	0,15	-1,67

Figura 16 – Erro relativo do volume total (em azul), Tp (em vermelho) e Qp (em verde) entre o hidrograma observado e o hidrograma calculado pelo método original.

A partir destes resultados, fica evidente a necessidade de encontrar outros valores para os parâmetros λ e Tp que produzam resultados melhores para a sub-bacia Cascata I.

4.2 Calibração SCS-CN-HUS por evento

4.2.1 Resultados por evento

Para os 10 eventos selecionados aleatoriamente, foram calculados os hidrogramas com diversos valores de fator T_p e de perdas iniciais, sendo todos eles comparados visualmente com o hidrograma observado. O que originou uma grande quantidade de hidrogramas razoavelmente próximos ao hidrograma observado de cada evento, a partir destes foram filtrados os melhores pares de parâmetros, considerando os valores médios entre eles e também dando maior relevância àqueles melhor ajustados, até restar apenas um par para cada evento (Figura 17).

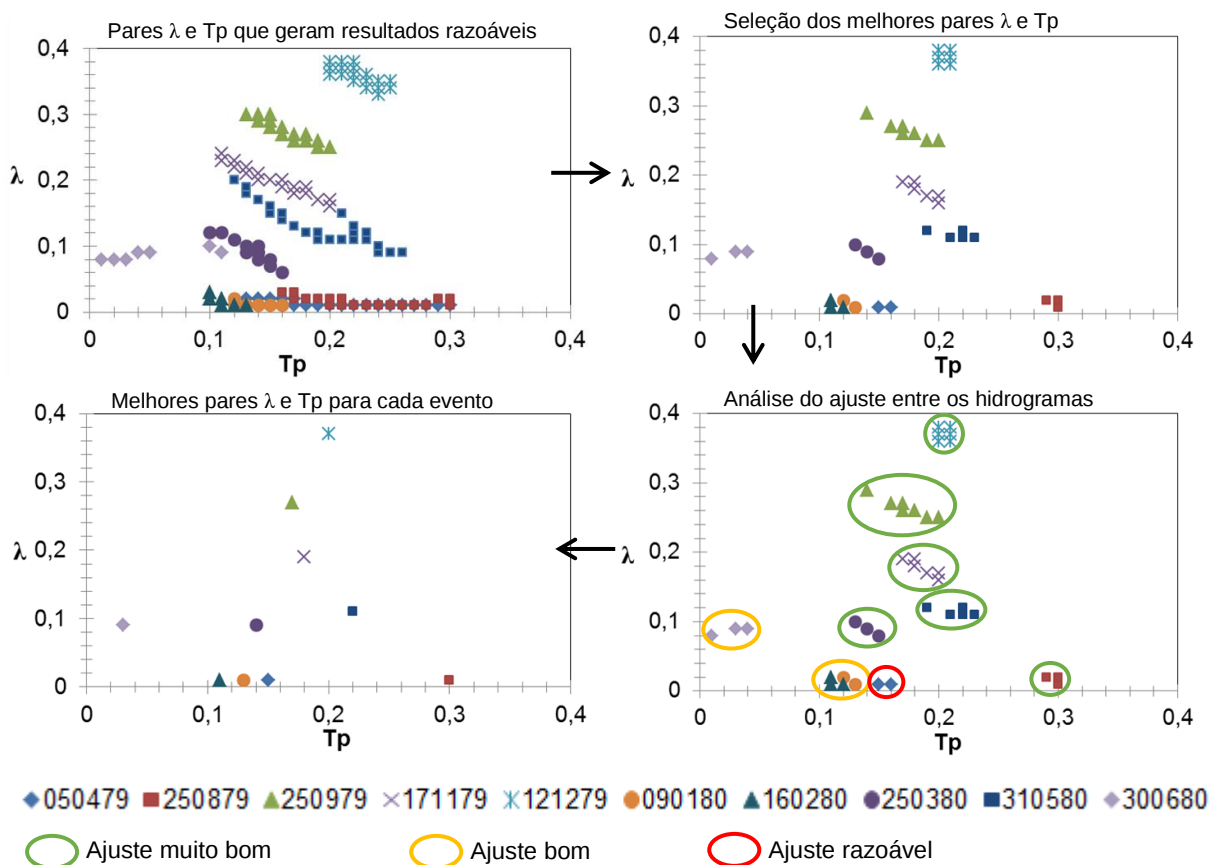


Figura 17 – Processo de seleção dos melhores pares de valores do fator T_p e λ para os eventos de calibração (os diferentes símbolos representam eventos distintos, conforme a legenda).

Os hidrogramas representados para o par ideal de cada evento estão apresentados na Figura 18. Observa-se que esses hidrogramas estão bem próximos do observado. O evento 050479 apresenta o pior ajuste (Figuras 17 e 18) e de acordo com a Tabela 1 é o evento com

menor porte de precipitação (7,02 mm), o que é coerente, já que o método SCS-CN-HUS é recomendado para eventos maiores. Segundo USDA (1986 apud MELESSE; GRAHAM, 2004), o valor mínimo de chuva recomendado para uso do método SCS-CN é de 12,75 mm. Ajmal e Kim (2014) utilizaram eventos com precipitação superior a 25,4 mm para diminuir os erros, seguindo informações de outros estudos científicos. Babu e Mishra (2012) também recomendam que o método seja aplicado apenas para grandes precipitações, por isso selecionaram precipitações que apresentassem $P/S > 0,456$. Para este estudo a precipitação mínima, adotando este critério, seria de 27,18 mm.

Também foram analisados o volume, T_p e Q_p para os eventos depois de calibrados (Tabela 9).

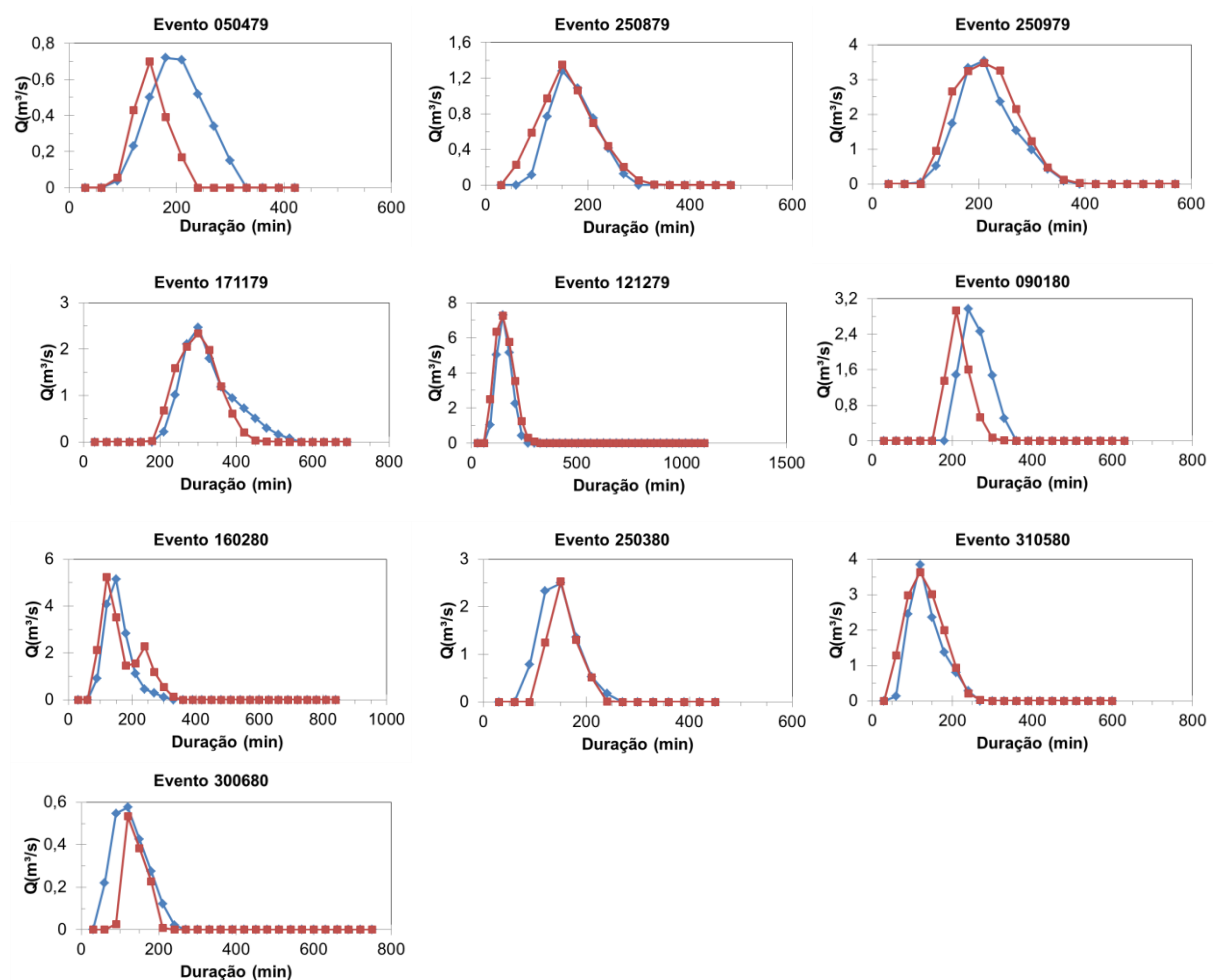


Figura 18 – Comparação entre o hidrograma observado (em azul) e o hidrograma calculado (em vermelho) com o melhor par de parâmetros selecionados para cada evento.

Tabela 9 – Comparação dos valores observados e calculados com o melhor par de parâmetros selecionados para cada evento.

Evento ID	V_{obs} (m ³)	V_{cal} (m ³)	ΔV (m ³)	Tp_{obs} (min)	Tp_{cal} (min)	ΔTp (min)	Qp_{obs} (m ³ /s)	Qp_{cal} (m ³ /s)	ΔQp (m ³ /s)
050479	5.776	3.144	-2.632	180	150	-30	0,72	0,7	-0,02
250879	8.163	10.068	1.904	150	150	0	1,28	1,35	0,07
250979	26.226	31.600	5.374	210	210	0	3,52	3,47	-0,05
171179	20.683	19.279	-1.405	300	300	0	2,46	2,34	-0,12
121279	38.142	48.593	10.451	150	150	0	7,28	7,25	-0,03
090180	15.984	11.685	-4.299	240	210	-30	2,97	2,93	-0,04
160280	26.838	32.438	5.600	150	120	-30	5,15	5,24	0,09
250380	13.824	10.117	-3.707	150	150	0	2,49	2,53	0,04
310580	20.214	25.342	5.128	120	120	0	3,84	3,64	-0,2
300680	3.933	2.123	-1.810	120	120	0	0,58	0,53	-0,05

As diferenças para os valores de volume são bem menores do que quando utilizado o método original e os valores de Tp e Qp são praticamente iguais aos valores observados. Estes resultados também podem ser vistos a partir dos erros relativos em percentual (Figura 19). Para a variável do volume todos os valores ficaram abaixo de 50%, em relação ao tempo de pico e à vazão de pico os erros são bem baixos, apresentando 0% de erro relativo para vários eventos.

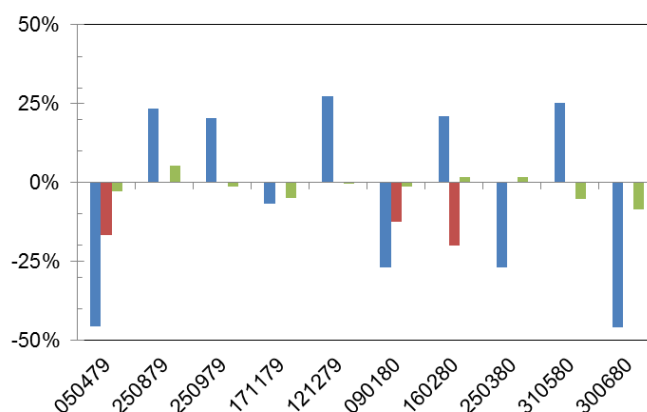


Figura 19 – Erro relativo do volume total (em azul), Tp (em vermelho) e Qp (em verde) entre o hidrograma observado e o hidrograma calculado com o melhor par de parâmetros selecionados para cada evento.

4.2.2 Análise dos parâmetros calibrados

Diante da ampla variação dos valores encontrados para cada evento, procurou-se estabelecer relações entre estes pares ótimos com as características dos respectivos eventos. Desse modo, foi feita uma análise dos pares de parâmetros calibrados em relação ao

coeficiente de escoamento global (C_g) e à precipitação total (P_t), a fim de encontrar alguma relação entre eles (Figura 20).

Nos gráficos a seguir, os círculos representam proporcionalmente o valor do C_g e P_t , respectivamente. Em relação ao C_g não se tem uma relação notável, já em relação ao P_t pode-se observar que as maiores precipitações se encontram na parte superior do gráfico, onde as perdas iniciais também são maiores, e diminuem conforme se encontram mais abaixo, ou seja, quanto maior a precipitação, maior precisam ser as perdas iniciais para melhorar o ajuste do modelo SCS-CN-HUS aos dados observados.

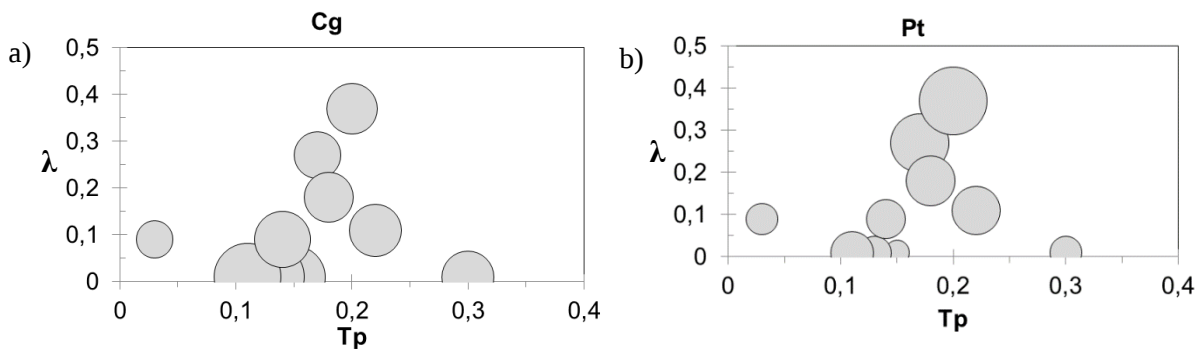


Figura 20 – (a) Relação entre T_p , λ e C_g . b) Relação entre T_p , λ e P_t .

Baseado nessa relação procurou-se estabelecer faixas de valores em relação à precipitação total para as quais foram determinados valores de perdas iniciais para cada uma (Figura 21). De acordo com os valores encontrados para cada evento foram estipulados valores médios de T_p e λ para as faixas apresentadas na figura 21. O valor do fator T_p para todos os eventos não passou de 0,30 (bem abaixo de 0,60) e o valor médio adotado foi 0,18 (o mesmo para as três faixas) e o valor de λ variou de acordo com a precipitação. Desta maneira, as faixas estabelecidas para este trabalho foram as seguintes:

- Para $P_t > 30$ mm $T_p = 0,18$ $\lambda = 0,32$
- Para $15 \text{ mm} < P_t \leq 30$ mm $T_p = 0,18$ $\lambda = 0,13$
- Para $P_t \leq 15$ mm $T_p = 0,18$ $\lambda = 0,01$

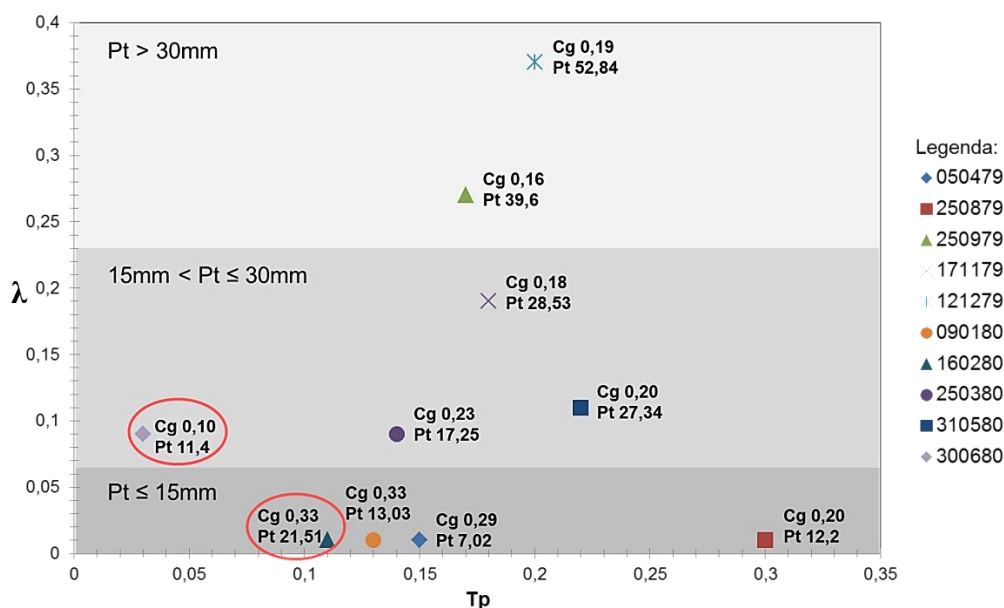


Figura 21 – Faixas utilizadas para estabelecer o valor de T_p e λ em relação à precipitação.

O valor do fator T_p estabelecido é bem menor que o valor original do método e para o fator de perdas iniciais foram adotados valores muito inferiores (0,01), inferiores (0,13) e superiores (0,32) ao valor de λ original do método. Os eventos circulados em vermelho ficaram fora da faixa estabelecida, mas de maneira geral os eventos se comportaram de acordo com o estabelecido nas faixas.

4.3 Simulação SCS-CN-HUS para parâmetros calibrados

4.3.1 Eventos usados na calibração

Utilizando os devidos parâmetros de acordo com a faixa estabelecida, foram recalculados os eventos utilizados inicialmente para a calibração. Os hidrogramas não apresentam resultados tão bons como os encontrados com a calibração, mas bem melhores do que os resultantes da simulação com o método SCS-CN-HUS original (Figura 22). E novamente foram analisados o volume, T_p e Q_p para os eventos da calibração depois de recalculados (Tabela 10).

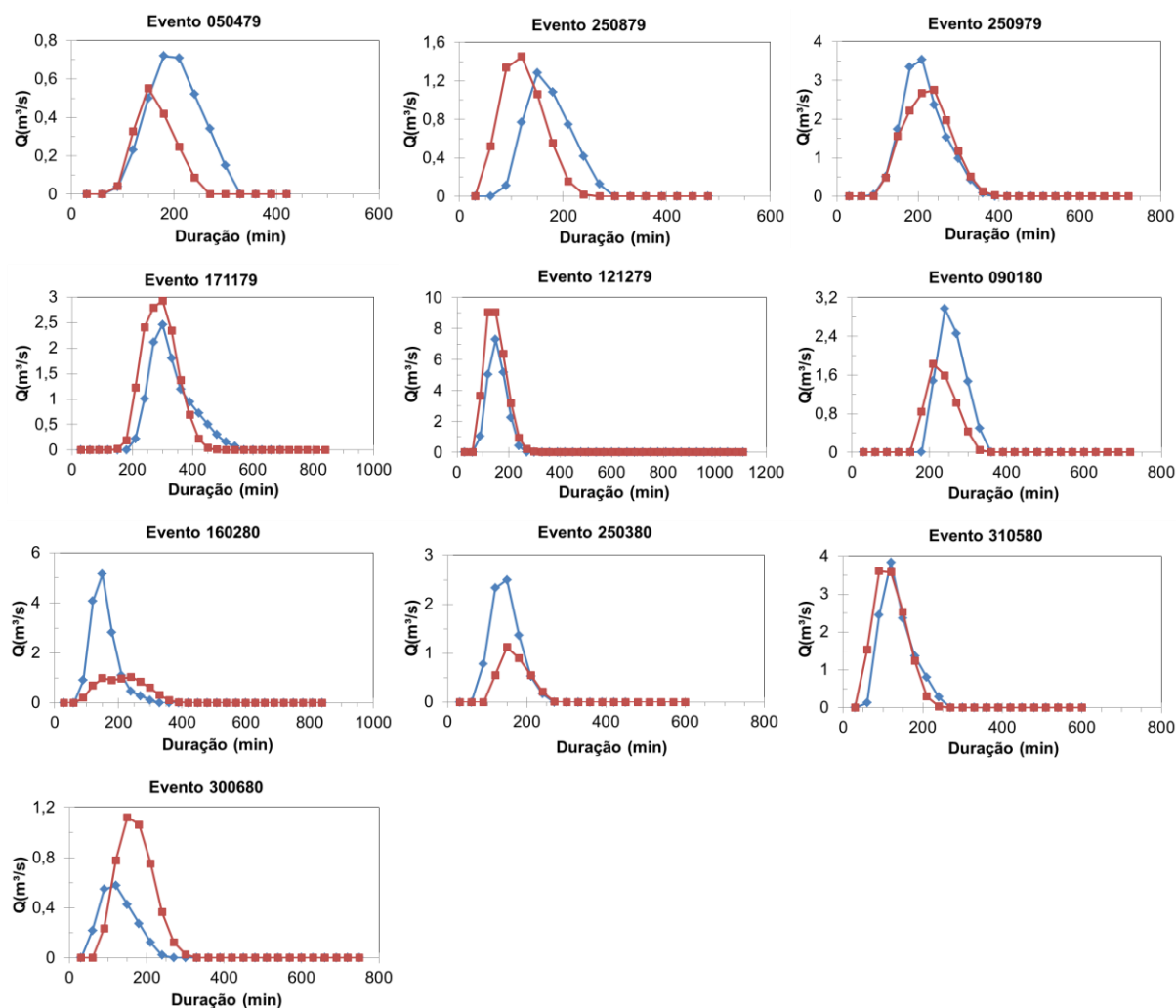


Figura 22 – Comparação entre o hidrograma observado (em azul) e o hidrograma calculado (em vermelho) com parâmetros de acordo com a faixa estabelecida, para os eventos da calibração.

Tabela 10 – Comparação dos valores observados e calculados com parâmetros de acordo com a faixa estabelecida, para os eventos da calibração.

Evento ID	V_{obs} (m³)	V_{cal} (m³)	ΔV (m³)	Tp_{obs} (min)	Tp_{cal} (min)	ΔTp (min)	Qp_{obs} (m³/s)	Qp_{cal} (m³/s)	ΔQp (m³/s)
050479	5.776	3.017	-2.759	180	150	-30	0,72	0,55	-0,17
250879	8.163	9.169	1.006	150	120	-30	1,28	1,45	0,17
250979	26.226	24.337	-1.889	210	240	30	3,54	2,75	-0,79
171179	20.683	25.667	4.984	300	300	0	2,46	2,93	0,47
121279	38.142	58.491	20.349	150	120	-30	7,28	9,05	1,77
090180	15.984	10.412	-5.572	240	210	-30	2,97	1,83	-1,14
160280	26.838	12.159	-14.679	150	240	90	5,15	1,05	-4,1
250380	13.824	6.045	-7.779	150	150	0	2,5	1,13	-1,37
310580	20.214	23.114	2.900	120	90	-30	3,84	3,61	-0,23
300680	3.933	8.035	4.102	120	150	30	0,57	1,12	0,55

Dessa forma, juntamente com os erros relativos em percentual (Figura 23), verifica-se que depois de recalculados os eventos da calibração apresentam bons resultados. Em relação ao volume total os erros se mantêm, em geral, abaixo de 50%, apenas para um evento o erro relativo fica em torno de 100%. Os erros relativos em relação ao tempo de pico são menores que 25%, exceto um evento que apresenta erro relativo de 60%. E para a vazão de pico apenas 3 eventos apresentam erros acima de 50%, os demais ficaram abaixo de 40%.

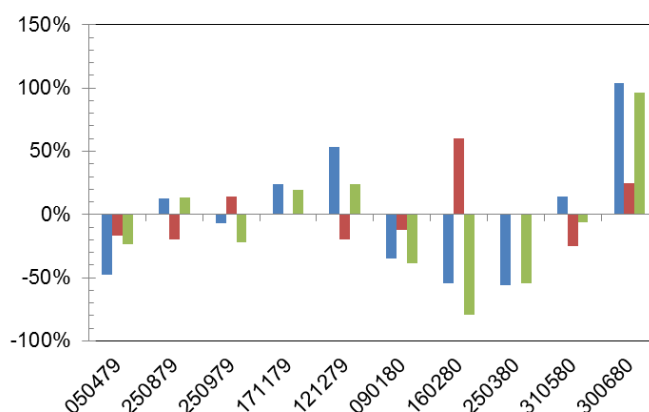


Figura 23 – Erro relativo do volume total (em azul), Tp (em vermelho) e Qp (em verde) entre o hidrograma observado e o hidrograma calculado com parâmetros de acordo com a faixa estabelecida, para os eventos da calibração.

4.3.2 Eventos de validação

O mesmo foi feito para os eventos reservados para a validação. Para cada evento foram usados os parâmetros do fator Tp e λ , de acordo com as faixas de precipitação estabelecidas para este trabalho, para determinar os hidrogramas (Figura 24). Também foram calculados os valores de volume, tempo de pico e vazão de pico (Tabela 11) e o erro relativo percentual entre o hidrograma observado e o hidrograma calculado (Figura 25).

Em relação ao volume total, os erros relativos exibem grande variação (de 7% até 144%). Já em relação ao Tp poucos eventos ultrapassam os 50%. E quanto ao Qp também há uma ampla variação dos erros relativos (de 5% a 87%).

Percebe-se que comparativamente, em geral, os resultados para os eventos da calibração (Tabela 10) são mais bem estimados do que para os eventos da validação (Tabela 11).

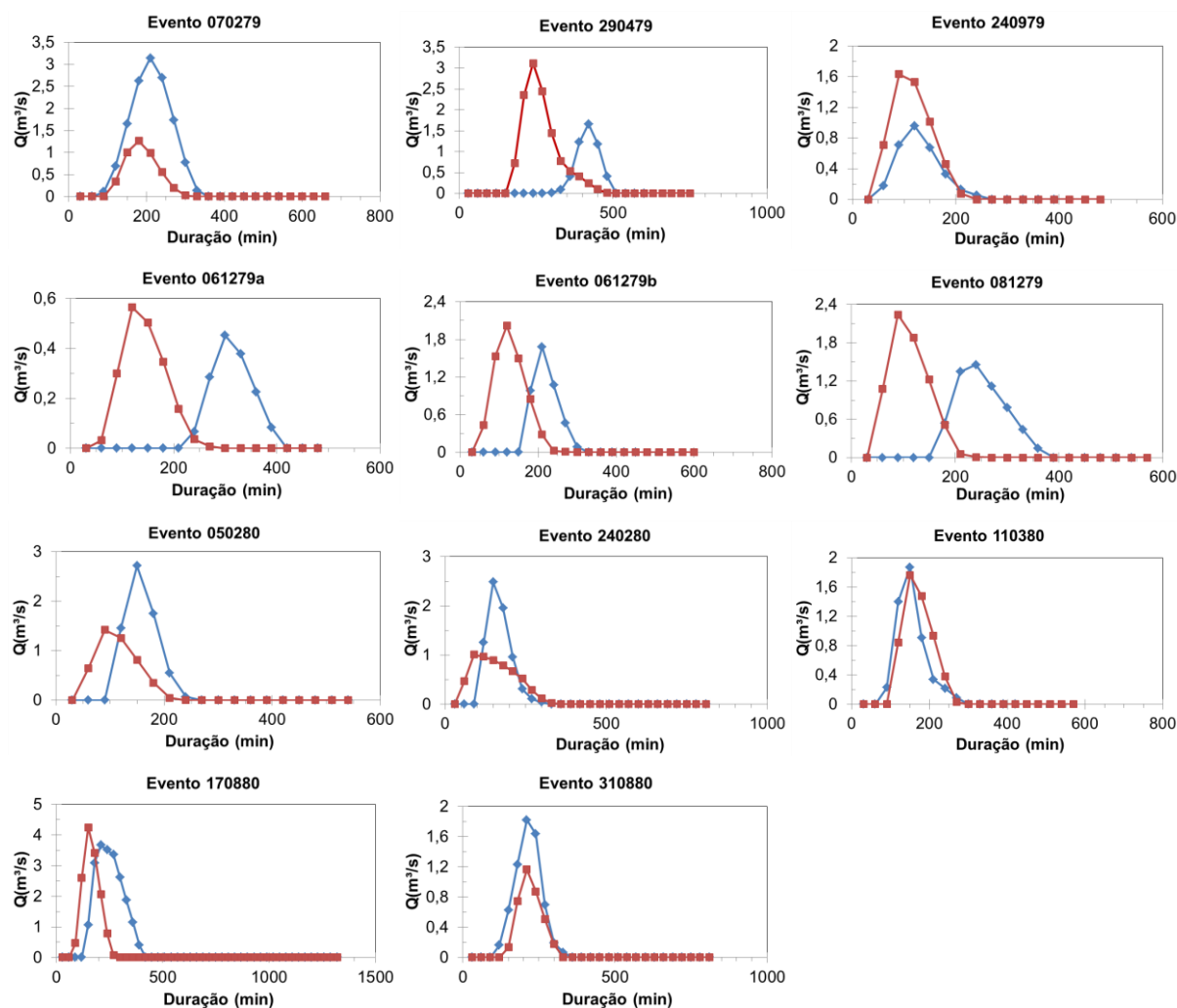


Figura 24 – Comparação entre o hidrograma observado (em azul) e o hidrograma calculado (em vermelho) com parâmetros de acordo com a faixa estabelecida, para os eventos da validação.

Tabela 11 – Comparação dos valores observados e calculados com parâmetros de acordo com a faixa estabelecida, para os eventos da validação.

Evento ID	V_{obs} (m ³)	V_{cal} (m ³)	ΔV (m ³)	Tp_{obs} (min)	Tp_{cal} (min)	ΔTp (min)	Qp_{obs} (m ³ /s)	Qp_{cal} (m ³ /s)	ΔQp (m ³ /s)
070279	24.417	7.870	-16.547	210	180	-30	3,15	1,26	-1,89
290479	8.973	21.885	12.912	420	240	-180	1,66	3,11	1,45
240979	5.463	9.760	4.297	120	90	-30	0,96	1,63	0,67
061279a	2.682	3.499	817	300	120	-180	0,45	0,56	0,11
061279b	7.722	11.978	4.256	210	120	-90	1,68	2,02	0,34
081279	10.485	12.603	2.118	240	90	-150	1,46	2,44	0,98
050280	11.745	8.173	-3.572	150	90	-60	2,71	1,42	-1,29
240280	12.807	10.381	-2.426	150	90	-60	2,48	1,01	-1,47
110380	9.108	9.775	667	150	150	0	1,87	1,77	-0,1
170880	37.305	24.561	-12.744	210	150	-60	3,67	4,24	0,57
310880	11.592	6.504	-5.088	210	210	0	1,82	1,17	-0,65

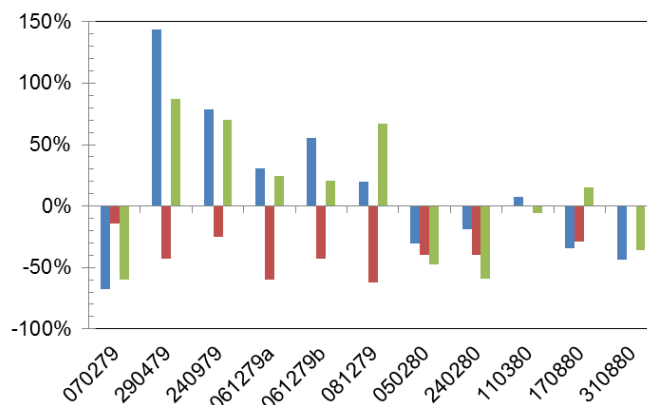


Figura 25 – Erro relativo do volume total (em azul), Tp (em vermelho) e Qp (em verde) entre o hidrograma observado e o hidrograma calculado com parâmetros de acordo com a faixa estabelecida, para os eventos da validação.

Mesmo com alguns eventos apresentando considerável discrepância nos valores encontrados em relação aos valores observados, ainda assim, os resultados para sub-bacia Cascata I, de modo geral, foram melhores aplicando os parâmetros estabelecidos para este trabalho do que os valores usuais do método SCS-CN-HUS. Comparando as Figuras 16, 23 e 25, de maneira geral, houve uma diminuição dos erros relativos em relação aos dados observados de, em média, 100% (utilizando os parâmetros originais) para, em média, menos de 40% (utilizando os parâmetros calibrados) para a maioria dos eventos.

4.3.3 Em relação à precipitação efetiva

A precipitação efetiva foi calculada com diferentes valores para λ , os resultados estão apresentados na Tabela 12. Em destaque tem-se o fator de perdas iniciais 0,01; 0,13; 0,32 que foram utilizados para calibração e validação deste trabalho (o restante são valores igualmente espaçados entre estes valores). Os valores mais próximos da precipitação efetiva observada para cada evento estão em verde, circulos com a borda preta encontram-se os valores calculados com o λ , respectivo às faixas estabelecidas em relação à precipitação total, utilizado na calibração e/ou validação (Figura 21).

Observa-se que alguns eventos apresentam melhores resultados, em relação à precipitação efetiva, quando calculados com λ diferente daquele utilizado para sua calibração e/ou validação. Esta diferença pode ter gerado algumas distinções entre os dados observados e os resultados calculados após a calibração e validação.

Tabela 12 – Precipitação efetiva calculada com diferentes valores para λ e comparada com a precipitação efetiva observada.

Evento	P(obs) (mm)	Pef (obs) (mm)	Pexc acumulada total (mm)									
			λ 0,01	λ 0,05	λ 0,09	λ 0,13	λ 0,17	λ 0,21	λ 0,25	λ 0,29	λ 0,32	λ 0,36
070279	18,66	4,89	4,09	3,15	2,31	1,58	0,97	0,49	0,17	0,01	0	0
050479	7,02	1,16	0,60	0,24	0,04	0	0	0	0	0	0	0
290479	26,75	1,80	7,79	6,58	5,44	4,38	3,41	2,54	1,78	1,13	0,73	0,32
250879	12,20	1,64	1,84	1,18	0,65	0,27	0,05	0	0	0	0	0
240979	12,60	1,09	1,95	1,28	0,73	0,32	0,07	0	0	0	0	0
250979	39,60	5,26	15,13	13,61	12,14	10,73	9,37	8,08	6,85	5,69	4,87	3,86
171179	28,53	4,14	8,72	7,45	6,26	5,14	4,11	3,16	2,32	1,58	1,11	0,60
061279a	7,54	0,54	0,70	0,30	0,06	0	0	0	0	0	0	0
061279b	14,02	1,55	2,40	1,65	1,03	0,54	0,20	0,02	0	0	0	0
081279	14,40	2,10	2,52	1,76	1,12	0,60	0,24	0,04	0	0	0	0
121279	52,84	7,64	23,98	22,26	20,57	18,91	17,29	15,72	14,18	12,70	11,62	10,22
090180	13,03	3,20	2,09	1,39	0,81	0,38	0,10	0	0	0	0	0
050280	11,50	2,35	1,64	1,02	0,53	0,19	0,02	0	0	0	0	0
160280	21,51	5,38	5,30	4,25	3,29	2,44	1,68	1,05	0,56	0,21	0,05	0
240280	13,01	2,57	2,08	1,38	0,81	0,38	0,10	0	0	0	0	0
110380	12,61	1,83	1,96	1,28	0,73	0,32	0,07	0	0	0	0	0
250380	17,25	2,77	3,54	2,66	1,87	1,21	0,68	0,29	0,06	0	0	0
310580	27,34	4,05	8,10	6,87	5,71	4,63	3,64	2,74	1,95	1,27	0,85	0,41
300680	11,40	0,79	1,61	0,99	0,51	0,18	0,01	0	0	0	0	0
170880	28,02	7,48	8,45	7,20	6,02	4,92	3,90	2,98	2,16	1,45	1,00	0,51
310880	17,62	2,32	3,68	2,78	1,98	1,30	0,75	0,33	0,08	0	0	0

Os gráficos da Figura 26 utilizam os dados da Tabela 12 e relacionam a precipitação efetiva observada (Pef (obs)) com a precipitação excedente acumulada total para todos os eventos. As cores dos pontos dos gráficos estão associadas com as faixas de precipitação descritas na Figura 20, os pontos mais escuros correspondem aos eventos de precipitação mais baixa e os pontos brancos representam as precipitações maiores.

Os melhores resultados ocorrem para os menores valores do fator de perdas iniciais, principalmente para $\lambda = 0,01$ e $0,05$, em que se observa um maior número de valores próximos à linha de tendência. Para λ em torno de $0,20$, a precipitação efetiva para quase todos os eventos é subestimada, apenas os eventos com maior precipitação permanecem superestimados. Estes eventos apresentam melhores resultados para λ a partir de $0,30$.

Yuan (2012) também aponta a sensibilidade do cálculo da precipitação excedente em relação às perdas iniciais, principalmente para eventos de baixas precipitações. Como verificado anteriormente na Figura 1 deste trabalho, o método do SCS tende a superestimar a

precipitação efetiva total para eventos maiores, o que é resultado do decaimento do CN com o aumento da precipitação, e para os eventos menores, constata-se que a maior parte da precipitação é contabilizada nas perdas iniciais e, conseqüentemente, o escoamento superficial é subestimado (CUNHA et al., 2015). Por isso, para este trabalho os melhores resultados para os menores eventos utilizaram o fator de perdas iniciais mais baixo.

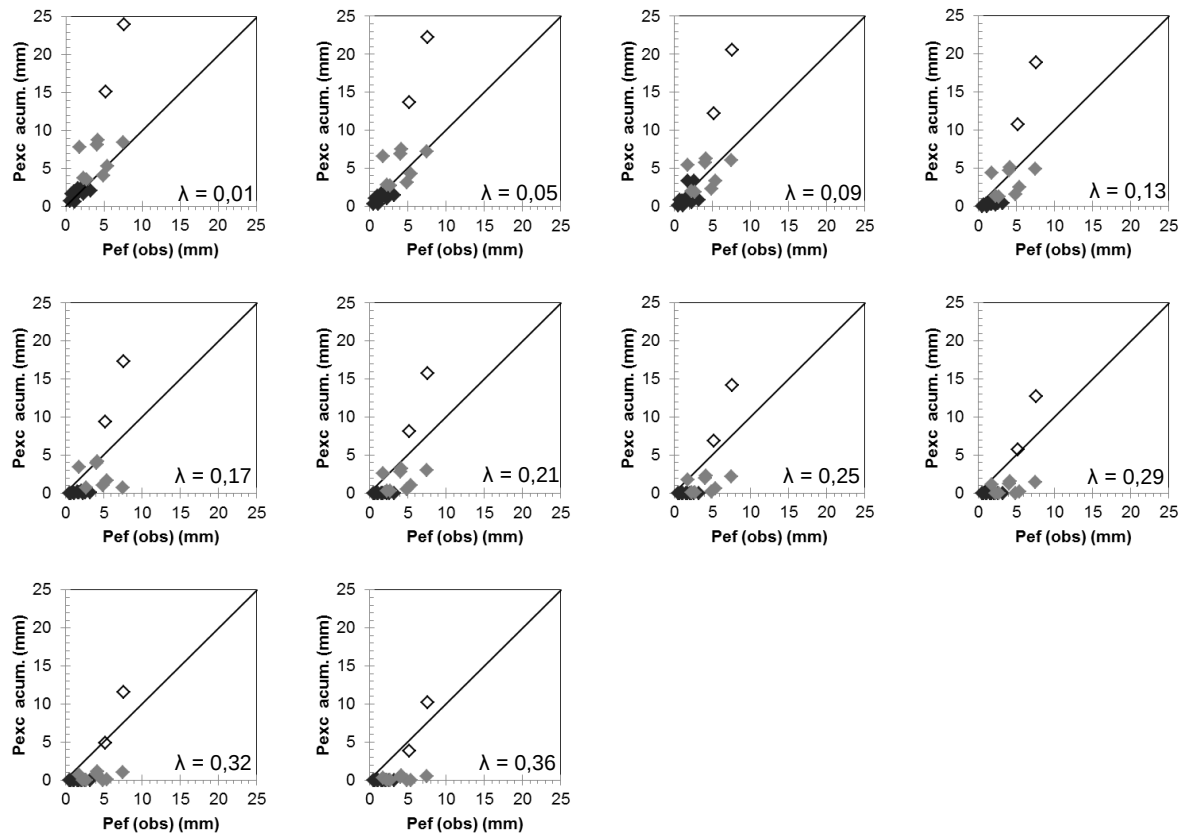


Figura 26– Comparação entre precipitação efetiva observada e calculada com diferentes valores de λ (os pontos mais escuros correspondem aos eventos de precipitação mais baixa, os pontos cinzas são as precipitações médias e os pontos brancos representam as precipitações maiores, de acordo com as faixas de precipitação descritas na Figura 21).

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos para este trabalho e o exposto por outros autores que fundamentaram este estudo, há uma indicação que o método SCS-CN-HUS não consegue representar de forma apropriada a simulação de chuva-vazão em diferentes locais. Portanto, é importante realizar a calibração dos parâmetros que integram as equações empíricas propostas no método.

Além disso, pode-se determinar que λ varia com o valor da precipitação do evento (devido o decaimento do CN com o aumento da precipitação), sendo necessário para trabalhos futuros também analisar a relação do CN com o porte das precipitações e calibrar este valor e não apenas utilizar as tabelas propostas pelo método.

Durante a execução do trabalho, houveram outras incertezas, devido aos erros intrínsecos à aplicação do método SCS-CN-HUS, que podem ter influenciado de certa maneira nos resultados. Entre eles pode-se destacar a distribuição uniforme da precipitação dentro do intervalo de tempo, a distribuição espacial uniforme da precipitação na bacia hidrográfica e a representação linear do escoamento superficial. A separação do escoamento superficial e subterrâneo gera algumas incertezas.

Outra consideração feita neste trabalho foi em relação à condição de umidade antecedente do solo, que foi considerada a condição média devido à falta de informações. Isso pode ter implicado em erros na determinação da precipitação efetiva.

O intervalo de tempo Δt adotado neste trabalho foi de 30 minutos, utilizando intervalos menores para os próximos estudos, os hidrogramas podem apresentar melhor ajuste. A adoção de um maior número de bacias e eventos para a calibração pode gerar resultados melhores e mais confiáveis.

Nem todas as bacias possuem dados históricos para que possam ser calibradas, desta forma, é necessário estabelecer relações entre os parâmetros utilizados no método e as características das bacias e dos eventos de precipitação, criando faixas e critérios, como os estabelecidos para este trabalho.

Os custos e o esforço para a aplicação mais criteriosa do método são compensados com a redução dos custos decorrentes do superdimensionamento de estruturas hidráulicas e em projetos de engenharia de modo geral, e por outro lado também possibilita o planejamento adequado das estruturas compensatórias de drenagem urbana, evitando o seu subdimensionamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJMAL, M.; KIM, T. W. Quantifying excess stormwater using CN-SCS-based rainfall runoff models and different curve number determination methods. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, American Society of Civil Engineers, 2014.

ALVES, C. A. **Estimativa da área impermeável dentro da bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio (Porto Alegre/RS) através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

BRANDÃO, I. N.; FERREIRA, M. E. **Bacia do Rio Pararangaba (São José dos Campos–SP): características físicas e impactos da urbanização**. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. 2000.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 2007.

CAMPANA, N. A.; TUCCI, C. E. M. Previsão da vazão em macrobacias urbanas: Arroio Dilúvio em Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 4, n. 1, p. 19-33, 1999.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de texto, 2005, 384p.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia: Para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013, 336p.

COSTA, A. H. A. **Simulação dos impactos da urbanização sobre as inundações urbanas na bacia hidrográfica do rio Cuiá (PB)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

COSTA, F. F. **Abordagem distribuída para simulação chuva-vazão em pequenas bacias hidrográficas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

CUNHA, S. F.; SILVA, F. E. O.; MOTA, T. U.; PINHEIRO, M. C. Avaliação da Acurácia dos Métodos dos SCS para Cálculo da Precipitação Efetiva e Hidrogramas de Cheia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n.4, p. 837-848, out/dez. 2015.

DECINA, T. G. T. **Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação de solo na bacia hidrográfica do córrego do Gregório, São Carlos –**

SP. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. 176 p.

FRITZEN, M.; BINDA, A. L. Alterações no Ciclo Hidrológico em Áreas Urbanas: Cidade, Hidrologia e Impactos no Ambiente. Goiânia-GO. **Ateliê Geográfico**, v. 5, n. 3, p. 239-254, dez. 2011.

GARCIA, J.I.B.; PAIVA, E.M.C.D. Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia do Arroio Cancela - RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 11, p. 1-10, 2006.

HASENACK, H.; WEBER, E.; MARCUZZO, S. **Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre: Geologia, Solos, Drenagem, Vegetação e Ocupação**. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente. 84 p. 2008.

JEON, J. H.; LIM, K. J.; ENGEL, B. A. Regional calibration of SCS-CN L-THIA model: application for ungauged basins. **Water**, Switzerland, 2014.

LAUTHARTE, S. L., **Verificação do modelo de hidrograma unitário da SCS para sub-bacias hidrográficas de porto alegre**. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

MARINHO FILHO, G. M. et al. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas v. 6, n. 2, p. p. 35-47, 2012.

MELESSE, A. M.; GRAHAM, W. D. Storm runoff prediction based on a spatially distributed travel time method utilizing remote sensing and GIS. **Journal of the American Water Resources Association**. 2004.

MENEZES FILHO, F. C. M.; TUCCI, C.E.M. Alteração na relação entre densidade habitacional x área impermeável: Porto Alegre-RS. **Revista Gestão de Água da América Latina**, v. 9, n. 1, p. 49-55, 2012.

MOG, W.; CAMPOS, H. Á.; PICCININI, L. S. Análise morfológica de espaços urbanos em bacias hidrográficas: um olhar sobre o entorno do Arroio Dilúvio em Porto Alegre. **Cadernos Metrópole**., v. 16, n. 31, p. 221-239, 2014.

OMAZ, P. Curso de manejo de águas pluviais – Capítulo 99. São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos_livros/livro_metodo_calculos_vazao/capitulo99.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2017.

PAZ, A. R. **Hidrologia Aplicada**. 2004.

PORTO ALEGRE. Decreto nº 18.611, de 9 de abril de 2014. Regulamenta o controle da drenagem urbana. 2014.

PORTO ALEGRE. Plano Diretor de Drenagem Urbana. Manual de Drenagem Urbana. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, v. 6, Porto Alegre, 2005.

REIS, J. T.; PEREIRA FILHO, W.; DA SILVEIRA, A. L. L. Estimativa entre densidade habitacional e áreas impermeáveis na região urbana da sub-bacia hidrográfica do arroio Cadena em Santa Maria, RS. **Ciência e Natura**, v. 33, n. 1, p. 145, 2011.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Programa de Ciência e Tecnologia para a Gestão de Ecossistemas. Ação “Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental”. Relatório Técnico Parcial. São Paulo, 2000, 60 p.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. B. 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**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 5-18, 2005.

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

SILVEIRA, A.L.L. Impactos hidrológicos da urbanização em Porto Alegre, In: Tucci, C.E.M.; Marques, D.M., 2000, **Avaliação e Controle da Drenagem Urbana**, Editora da Universidade/UFRGS, Porto Alegre, p. 153-163, 2000.

SILVEIRA, L. L. S. Fator de Pico para Hidrogramas Unitários Sintéticos Triangulares. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 46-52, jan./mar. 2016.

SUPHUNVORRANOP, T. Technical Publication No. 85-5, a Guide to SCS Runoff Procedures. **St. Johns River Water Management District**, Department of Water Resources, Flórida, 1985.

SURESH BABU, P.; MISHRA, S. K. Improved SCS-CN-inspired model. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 11, p. 1164-1172, 2011.

TARGA, M. S. et al. Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 120-142, 2012.

TASSI, R. et al. **Determinação do parâmetro CN para sub-bacias urbanas do Arroio Dilúvio – Porto Alegre/RS**. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, Curitiba, 2006.

TUCCI, C. E. M. **Gestao de águas pluviais urbanas. Saneamento para todos.** Programa de modernização do setor saneamento. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Ministério das Cidades. Brasília, 2005a.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos.** Porto Alegre: UFRGS, 2005b. 678 p.

TUCCI, C. E. M. Parâmetros do Hidrograma Unitário para Bacias Urbanas Brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 195–199, abr./jun. 2003.

TUCCI, C.E.M. Gerenciamento da Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 5-27, jan./mar. 2002.

USDA. Natural Resources Conservation Service. Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55. 1986.

USDA. Natural Resources Conservation Service. National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology, Chapter 16 Hydrographs, 2007.

VENDRAME, I. F.; LOPES, W. A. B. **Análise do crescimento urbano e seus efeitos na mudança da dinâmica de escoamento superficial da bacia do Pararangaba.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 12, p. 2555-2562, 2005.

WOODWARD, D. E. et al. **Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio.** In: World Water & Environmental Resources Congress. p. 1-10. 2003.

YUAN, Y. et al. Initial abstraction and curve numbers for semiarid watersheds in Southeastern Arizona. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 3, p. 774-783, 2014.