

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação de Mestrado

**Modelagem de cotas de cheias a partir de vazões derivadas de hidrogramas
unitários instantâneos geomorfológicos**

Jéssica Fernanda Ogassawara

Pelotas, 2019.

JÉSSICA FERNANDA OGASSAWARA

**Modelagem de cotas de cheias a partir de vazões derivadas de hidrogramas
unitários instantâneos geomorfológicos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título em Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Beskow

Coorientador: Prof. Dr. Maurício Dai Prá

Pelotas, 2019.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

O34m Ogassawara, Jéssica Fernanda
Modelagem de cotas de cheias a partir de vazões derivadas de hidrogramas unitários instantâneos geomorfológicos / Jéssica Fernanda Ogassawara ; Samuel Beskow, orientador ; Maurício Dai Prá, coorientador. – Pelotas, 2019. 170 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. Modelagem hidráulica-hidrológica. 2. Propostas geomorfológicas. 3. Eventos extremos. 4. HEC-HMS. 5. HEC-RAS. I. Beskow, Samuel, orient. II. Dai Prá, Maurício, coorient. III. Título.

CDD: 627

Jéssica Fernanda Ogassawara

Modelagem de cotas de cheias a partir de vazões derivadas de hidrogramas unitários instantâneos geomorfológicos.

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 25/02/2019

Banca examinadora:

.....
Prof. Dr. Samuel Beskow (Orientador)
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras.

.....
Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras.

.....
Prof. Dr. Hugo Alexandre Soares Guedes
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa.

.....
Prof. Dr. Vitor Emanuel Quevedo Tavares
Doutor em Ciência e Tecnologia de Sementes pela Universidade Federal de Pelotas.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Samuel Beskow pelo profissionalismo, orientação, dedicação, pelo conhecimento compartilhado e motivação ao longo desta jornada.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Maurício Dai Prá pela orientação, conhecimento e experiências compartilhadas.

Aos meus pais, Rosemeire e Edson, que sempre acreditaram no meu potencial e que nunca mediram esforços para me proporcionar educação.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica, Alice, Maíra, Marcelle, Tamara, Tamires, Viviane, e Zandra, por todo apoio, ajuda, motivação, aprendizado e pela amizade que construímos.

À Daiane do laboratório de Geotecnologias pela ajuda nas saídas de campo e principalmente pelos incentivos, conselhos e amizade.

Ao técnico, Reginaldo Bonczynski, pelo suporte e conhecimento partilhado ao longo das atividades de campo.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, pelos ensinamentos ministrados no curso.

Às minhas colegas que ingressaram comigo no mestrado, Thaís, Cássia, Nelva, Taynara e Viviane pelas risadas, carinho, motivação, encorajamento e abraços acolhedores.

Às colegas de apartamento Francine, Taiane e Débora pela compreensão, torcida e por sempre estarem dispostas a ouvir sobre minhas alegrias e tristezas.

Às minhas queridas amigas e familiares, Andriele, Ingrid, Tainã e Eliana que mesmo distante sempre se fizeram presentes.

À minha amiga Kauana, que durante estas últimas etapas nunca deixou de me motivar e por me fazer sentir orgulho do que faço.

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pelotas pela estrutura física e intelectual, e à Universidade Federal de Pelotas pela acolhida e oportunidades.

*“Nada é tão nosso quanto
os nossos sonhos.”*

Friedrich Nietzsche

Resumo

OGASSAWARA Jéssica Fernanda. **Modelagem de cotas de cheias a partir de vazões derivadas de hidrogramas unitários instantâneos geomorfológicos**. 2019. 170f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

Diante à falta de monitoramento hidrológico e meteorológico das bacias hidrográficas de pequeno e médio porte e devido à atual discretização temporal das séries históricas de dados fluviométricos gratuitamente disponíveis ao público, tem-se cada vez mais incentivado estudos e desenvolvimento de técnicas de estimativa de hidrogramas de escoamento superficial direto (ESD), sendo que esse possui grande relevância para a análise de vazões resultantes de eventos de chuva intensa. Entre estas técnicas destaca-se a teoria do Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI) e a do Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUI_{GEO}). Um modelo de HUI amplamente utilizado é o de Clark (HUIC), para o qual diversas propostas geomorfológicas vêm sendo desenvolvidas, estabelecendo relações entre os parâmetros do HUIC e as características físicas das bacias hidrográficas. Recentemente a versão modificada do HUIC (ModClark) também vem sendo amplamente aplicada, com intuito de verificar o desempenho da simulação de hidrogramas de ESD em relação a discretização espacial das bacias. No tocante à gestão de cheias em bacias hidrográficas, a combinação de modelos hidrológicos e hidráulicos é de suma importância, pois possibilitam simular perfis da superfície de água e cotas de cheias. Sendo assim, o objetivo principal deste estudo foi avaliar uma ferramenta para estimativa de cotas de linha d'água originados em função de eventos extremos de chuva, combinando modelagem hidrológica por meio do ModClark e fundamentado em parâmetros geomorfológicos, com modelagem hidráulica. A área de estudo compreende a bacia hidrográfica experimental do arroio Cadeia (BHAC) que é uma importante sub-bacia da bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP), dotada de monitoramento hidrológico, localizada no sul do Rio Grande do Sul. Inicialmente, foram selecionados diferentes eventos de chuva-vazão e analisados os hietogramas e hidrogramas correspondentes. A separação do ESD referente a cada evento e quantificação de seu volume foram obtidos pelo Método das Inflexões e pela Regra dos Trapézios, respectivamente. Já o hietograma de precipitações efetivas foi obtido pelo método do Número da Curva (CN). O conjunto de dados acima mencionado foi usado como entrada para modelagem hidrológica baseada no ModClark aplicando o software HEC-HMS. Para a calibração dos parâmetros dos modelos, empregou-se o algoritmo Nelder Mead. Os dados de vazões de pico dos hidrogramas obtidos através da modelagem hidrológica foram utilizados como dados de entrada no software HEC-RAS para a modelagem hidráulica, visando à estimativa das cotas de cheias e do perfil longitudinal da linha d'água no trecho do curso d'água principal da BHAC em análise. Além destes dados, também foi necessário a obtenção de dados topobatimétricos de seções transversais que foram levantadas ao longo do curso d'água principal da bacia, bem como suas características geométricas e o coeficiente de rugosidade de Manning. Com base nos resultados obtidos, as principais conclusões deste estudo foram: a) as formulações geomorfológicas não são universais e necessitam ser utilizadas com

cautela; b) as características fisiográficas da bacia em estudo tiveram grande influência sobre as propostas geomorfológicas; c) as propostas geomorfológicas exerceram influência no desempenho das estimativas de hidrogramas de ESD; d) a escolha da metodologia utilizada na modelagem hidrológica teve grande impacto nos resultados obtidos na modelagem hidráulica; e) os dados de entrada usados para modelagem hidráulica tiveram grande impacto na estimativa do nível de água associado às inundações.

Palavras-chaves: modelagem hidráulica-hidrológica, propostas geomorfológicas, eventos extremos, HEC-HMS, HEC-RAS.

Abstract

OGASSAWARA Jéssica Fernanda. **Modeling of water levels from stream flows derived from geomorphological instantaneous unit hydrographs.** 2019. 170f. Dissertation (Master of Science in Water Resources) – Graduate Program in Water Resources, Center for Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2019.

Given the lack of hydrological and meteorological monitoring in small and medium-sized watersheds and due to the current temporal discretization of the stream flow historical series freely available to the public, studies and development of techniques for estimating direct surface runoff (DSR) hydrographs have been increasingly conducted. Such studies have great relevance for the analysis of stream flows resulting from intense rainfall events. Among these techniques, the Instantaneous Unit Hydrograph (IUH) and the Geomorphological IUH (IUHGEO) theories deserve attention. Clark (CIUH) is a widely used IUH model and several geomorphological approaches have been developed for it by establishing relationships between CIUH's parameters and watersheds' physical characteristics. The modified version of the CIUH (ModClark) has been widely applied in order to verify its performance in relation to the discretization of the watersheds in modules. With regard to flood management in watersheds, the combination of hydrological and hydraulic models is of great importance, as it enables simulation of water levels and water surface profiles. In this context, the main objective of this study was to evaluate a tool for estimating water levels originated from extreme rainfall events, combining hydrological modeling – by means of the ModClark based on geomorphological parameters – and hydraulic modeling. The study area comprises the experimental Cadeia river watershed (CRW), an important sub-watershed of the Pelotas river watershed (PRW), which has active hydrological monitoring and is situated in the south of Rio Grande do Sul State. Different rainfall-runoff events were initially selected and the corresponding hyetographs and hydrographs were then analyzed. The runoff separation and the DSR depth were determined for each event by the Inflection Method and the Numerical Integration, respectively, whereas, effective rainfall hyetographs were derived from the Curve Number (CN) method. The aforementioned dataset was used as input for hydrological modeling based on the ModClark applying the HEC-HMS software. With respect to the calibration of parameters, the Nelder Mead algorithm was taken into account. The peak stream flow values derived from hydrological modeling were used as input data in the HEC-RAS software for hydraulic modeling in order to compute water levels and water surface profiles in the stretches under analysis of the Cadeia river. In addition, it was also necessary to obtain topographic and bathymetric data of cross sections that were surveyed along the main watercourse of the CRW, as well as their geometric characteristics and Manning's roughness coefficient. Based on the results obtained, the main conclusions of this study were: a) the geomorphological approaches are not universal and need to be used with caution; b) the physiographic characteristics of the watershed under study had great influence on the geomorphological approaches; c) the geomorphological approaches exerted influence on the performance of the DSR hydrograph estimations; d) the choice of the methodology used in the

hydrological modeling had a great impact on the results obtained in the hydraulic modeling; e) the input data used for hydraulic modeling had great impact on estimation of water level associated with floods.

Keywords: hydraulic and hydrological modeling; geomorphological approaches; extreme events; HEC-HMS, HEC-RAS.

Lista de Figuras

Figura 1 - Representação do ciclo hidrológico.	28
Figura 2 - Representação dos leitos principais de um curso de água.	31
Figura 3 - Eventos críticos de cheias no Brasil no ano de 2015.	33
Figura 4 – Estrutura de discretização.	36
Figura 5 – Princípio da proporcionalidade na teoria do HU.	40
Figura 6 – Princípio da superposição na teoria do HU.	40
Figura 7 - Localização da BHAC-PCF e da BHAC em sua região hidrográfica.	50
Figura 8 - Planos de informações utilizados para gerar o Modelo Digital de Elevação.	51
Figura 9 - Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente empregado para processar a base de dados espaciais da BHAC.	52
Figura 10 – Discretização espacial da BHAC e das sub-bacias à montante das seções transversais.	53
Figura 11 – Discretização espacial da BHAC e das sub-bacias à montante e a jusante das seções transversais.	54
Figura 12 - Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente da BHAC e das sub-bacias.	55
Figura 13 - Distribuição dos valores de declividade do terreno para a BHAC e para as sub-bacias.	57
Figura 14- Distribuição das classes de solo para a BHAC e para as sub-bacias.	58
Figura 15 - Distribuição das classes de uso e ocupação do solo para a BHAC e para as sub-bacias.	60
Figura 16 – Estação pluviográfica e limimétrica utilizada para modelagem de cheias na BHAC.	61
Figura 17 - Ilustração da unidade de aquisição e armazenamento de informações hidrológicas de chuva da estação EH-H03 modelo HOBO Pluviômetro Digital - U30-GSM, marca Onset.	62
Figura 18 - Ilustração da seção de controle do arroio Cadeia com a estrutura para monitoramento automático de nível d'água e também por régua limimétrica (a); e da unidade de aquisição e armazenamento de informações hidrológicas de chuva e de nível da estação modelo Solar SL2000PNVn, instalada na mesma seção (b).	63
Figura 19 - Ilustração da estação pluviográfica EH-P08 modelo HOBO Pluviômetro Digital – RG3-M, marca Onset, tendo mais 9 estações deste modelo.	63

Figura 20 - Área de influência de cada estação de monitoramento com informações de chuva sobre a BHAC, considerando a metodologia dos Polígonos de Thiessen.	65
Figura 21- Campanha hidrológica para determinação de descarga líquida (a) usando micromolinete hidrométrico (b).	66
Figura 22 - Curva-chave para a seção de controle da BHAC.	67
Figura 23 - Representação do Método das Inflexões utilizado na separação do ESD do escoamento total.	68
Figura 24 - Ilustração das abstrações iniciais (I_a) seguido da precipitação efetiva (P_e), continuação das abstrações (F_a) e precipitação total (P).	71
Figura 25- Representação do modelo de Clark.	73
Figura 26- Representação do modelo ModClark.	74
Figura 27- Diagrama hierárquico de processos envolvidos na modelagem hidrológica utilizando o HEC-HMS, sendo que as etapas e os métodos usados neste estudo estão enfatizados em vermelho.	79
Figura 28 - Representação dos elementos da modelagem concentrada no software HEC-HMS.	80
Figura 29 - Representação dos elementos da modelagem semi-distribuída no software HEC-HMS.	81
Figura 30 - Localização das seções transversais ao longo da BHAC.	85
Figura 31 – Representação dos termos da Equação da Energia.	88
Figura 32 – Localização dos trechos entre as seções transversais.	116
Figura 33 - Ilustração da seção transversal 1 (seção de controle da BHAC).	117
Figura 34- Ilustração da seção transversal 2.	117
Figura 35- Ilustração da seção transversal 3.	118
Figura 36- Ilustração da seção transversal 4.	118
Figura 37- Ilustração da seção transversal 5.	119
Figura 38- Ilustração da seção transversal 6.	119

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Área das sub-bacias.....	54
Tabela 2 - Valores percentuais da área de cada classe de declividade para a BHAC	57
Tabela 3 - Classes de solos para a BHAC e para as sub-bacias.....	58
Tabela 4 - Classes de uso do solo para a BHAC e para as sub-bacias	60
Tabela 5 - Estações de monitoramento indicadas pelos Polígonos de Thiessen e suas respectivas áreas de influência.....	65
Tabela 6 – Coordenadas das margens esquerda e direita das seções transversais	86
Tabela 7 - Caracterização dos eventos empregados na modelagem de cheias, referentes a precipitação totais (P_{Total}), intensidade média (i_m), intensidade máxima ($i_{m\acute{a}x}$) e a vazão total máxima ($Q_{Total_m\acute{a}x}$).....	92
Tabela 8 - Características do hidrograma de ESD para cada evento analisado na BHAC	94
Tabela 9 - Valores calibrados do Número da Curva (CN) para a modelagem concentrada e semi-distribuída para cada evento.....	95
Tabela 10 - Valores das estatísticas da calibração dos CNs para a BHAC como um todo (calibração 1) e para o conjunto das sub-bacias S1 e S2 (calibração 2).....	96
Tabela 11 - Valores das estatísticas da calibração dos CNs para o conjunto das sub-bacias S3 e S4 (calibração 3) e para o conjunto S5 e S6 (calibração 4).....	96
Tabela 12 - Valores das estatísticas da calibração dos CNs para o conjunto das sub-bacias S7 e S8 (calibração 5) e para o conjunto S9 e S10 (calibração 6).....	96
Tabela 13 - Valores de t_c e R para as propostas geomorfológicas empregada neste estudo, considerando a modelagem concentrada (cenário 1).....	98
Tabela 14 - Valores das abstrações iniciais (I_a) para cada evento, considerando a modelagem concentrada (cenário 1).....	98
Tabela 15 - Valores de t_c e R para as propostas geomorfológicas empregadas neste estudo, considerando a modelagem semi-distribuída (cenário 2)	99
Tabela 16 - Valores das abstrações iniciais (I_a) para cada evento, considerando a modelagem semi-distribuída (cenário 2)	99
Tabela 17 - Valores das estatísticas de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), erro da vazão de pico (ER_{Qp}) e erro do tempo de pico (ER_{tp}) para o modelo modificado de Clark (ModClark) analisado neste estudo, considerando a modelagem concentrada.....	104

Tabela 18 - Valores máximos, mínimos e médios das estatísticas considerando a modelagem concentrada e as propostas geomorfológicas empregadas neste estudo, com base em 8 eventos chuva-vazão	105
Tabela 19 - Valores das estatísticas de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), erro da vazão de pico (ER_{Qp}) e erro do tempo de pico (ER_{tp}) para o modelo modificado de Clark (ModClark) analisado neste estudo, considerando a modelagem semi-distribuída para a S1 e S2	106
Tabela 20 - Valores das estatísticas de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), erro da vazão de pico (ER_{Qp}) e erro do tempo de pico (ER_{tp}) para o modelo modificado de Clark (ModClark) analisado neste estudo, considerando a modelagem semi-distribuída para a S3 e S4	107
Tabela 21 - Valores das estatísticas de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), erro da vazão de pico (ER_{Qp}) e erro do tempo de pico (ER_{tp}) para o modelo modificado de Clark (ModClark) analisado neste estudo, considerando a modelagem semi-distribuída para a S5 e S6	108
Tabela 22 - Valores das estatísticas de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), erro da vazão de pico (ER_{Qp}) e erro do tempo de pico (ER_{tp}) para o modelo modificado de Clark (ModClark) analisado neste estudo, considerando a modelagem semi-distribuída para a S7 e S8	109
Tabela 23 - Valores das estatísticas de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), erro da vazão de pico (ER_{Qp}) e erro do tempo de pico (ER_{tp}) para o modelo modificado de Clark (ModClark) analisado neste estudo, considerando a modelagem semi-distribuída para a S9 e S10.....	110
Tabela 24- Valores máximos, mínimos e médios das estatísticas considerando a modelagem distribuída e as propostas geomorfológicas empregadas neste estudo, com base em 08 eventos chuva-vazão	112
Tabela 25 - Valores do coeficiente de rugosidade (n), vazão (Q), área da seção transversal (A), raio hidráulico (R_h) e declividade da linha de energia (\bar{S}_f)	116
Tabela 26 - Valores tabelados do coeficiente de Manning.....	120
Tabela 27 - Valores das simulações das vazões máximas para cada seção transversal empregando a P1	122
Tabela 28 - Valores das simulações das vazões máximas para cada seção transversal empregando a P2	122
Tabela 29- Valores das simulações das vazões máximas para cada seção transversal empregando a P3	122
Tabela 30- Valores das simulações das vazões máximas para cada seção transversal empregando a P4	122
Tabela 31 - Valores das vazões máximas observadas e simuladas para a seção de controle da BHAC.....	123

Tabela 32 - Valores das cotas simuladas em cada seção transversal empregando a P1	124
Tabela 33- Valores das cotas simuladas em cada seção transversal empregando a P2.....	125
Tabela 34- Valores das cotas simuladas em cada seção transversal empregando a P3.....	125
Tabela 35- Valores das cotas simuladas em cada seção transversal empregando a P4	125

Lista de Abreviaturas e Siglas

AMC	Antecedent Moisture Content
ANA	Agência Nacional de Águas
BHAC	Bacia Hidrográfica do Arroio Cadeia
BHAP	Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas até a seção de controle Ponte Cordeiro de Farias
CN	Curva-Número
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENVI	Environment for Visualizing Imagens
ESD	Escoamento Superficial Direto
ESRI	Environmental Systems Research Istitute
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler
HEC-1	Hydrologic Engineering Center 1 – Flood Hydrograph Package
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrological Modelling System
HTA	Histograma Tempo-Área
HU	Hidrograma Unitário
HUA	Hidrograma Unitário Adimensional
HUI	Hidrograma Unitário Instantâneo
HUIC	Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark
HUIC _{GEO}	Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark
HUI _{GEO}	Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico
HUS	Hidrograma Unitário Sintético
HUT	Hidrograma Unitário Triangular
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LASH	Lavras Simulation of Hydrology
LISEM	Llmburg Soil Erosion Model
MDE	Modelo Digital de elevação
MDEHC	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente

ModClarck	Hidrograma Unitário Instantâneo Modificado de Clark
NM	Nelder Mead
NRCS	Natural Resources Conservation Services
SANEP	Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas
SCS	Soil Conservation Service
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
UG	Univariate Gradient
USDA	United States Department of Agriculture
WWAP	World Water Assessment Programme

Lista de Símbolos

P_e	Precipitação efetiva
D	Duração da precipitação efetiva
P_u	Precipitação unitária
A	Área da bacia hidrográfica
$Q(t)$	Vazão no instante t
$P(t)$	Precipitação no instante t
$E(t)$	Evaporação no instante t
Q_{i+1}	Ordenada do HUIC
C_0, C_1	Coefficiente de ponderação do HUIC
R_E	Precipitação efetiva uniformemente distribuída
P	Perímetro da bacia hidrográfica
Q	Vazão
H	Nível da lâmina d'água
K_{A-C}	Constante de depleção do método da reta A-C
S	Percentual de armazenamento de água no solo
I_a	Abstração inicial
CN	Número da curva
L	Comprimento do curso d'água principal
X	Declividade média da bacia hidrográfica
Q_p	Vazão de pico
t_c	Tempo de concentração
R	Coefficiente de armazenamento da bacia hidrográfica
t	Intervalo de simulação
S_0	Declividade do curso d'água principal
C_{NS}	Coefficiente de Nash e Sutcliffe
$Q_{i_{obs}}$	Vazão observada

Q_{iest}	Vazão estimada
\overline{Q}_{obs}	Vazão média observada
N	Número de ordenadas do hidrograma
Q_{obs_p}	Vazão de pico observada
Q_{est_p}	Vazão de pico estimada
$Q_{obs_{tp}}$	Tempo da vazão de pico observada
$Q_{est_{tp}}$	Tempo da vazão de pico estimada
ER_{Qp}	Erro relativo na estimativa de tempo de pico
ER_{tp}	Erro relativo na estimativa de vazão de pico
Q	Vazão
R_h	Raio hidráulico
\overline{S}_f	Declividade do canal
n	Coefficiente de Manning
U	Velocidade do fluxo do canal
g	Aceleração da gravidade
y_h	Profundidade do fluxo do canal
Fr	Número de Froude
V	Velocidade de cada seção transversal
\overline{V}	Velocidade média de cada seção transversal
Z	Cotas do fundo do canal nas seções transversais
Y	Profundidade do escoamento nas seções transversais
α	Coefficiente de Coriolis
h_e	Perda de carga
i_m	Intensidade média
$i_{m\acute{a}x}$	Intensidade máxima
$Q_{Total_m\acute{a}x}$	Vazão total máxima
P_{Total}	Precipitação total
R^2	Coefficiente de determinação

L_{ca}	Comprimento medido ao longo do comprimento do curso d'água principal perpendicular ao centróide da bacia hidrográfica
$\bar{Q}_e, \bar{Q}_c, \bar{Q}_d$	Médias aritméticas das vazões entre as seções transversais para a margem esquerda, canal principal e margem direita
$L_e; L_c; L_d$	Comprimentos entre as seções transversais para o escoamento na margem esquerda, no canal principal e na margem direita

Sumário

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Hipóteses	25
1.2 Objetivo geral.....	25
1.3 Objetivos específicos	25
2 REVISÃO DA LITERATURA	27
2.1 Bacia hidrográfica e ciclo hidrológico	27
2.2 escoamento superficial	29
2.3 Eventos hidrológicos extremos.....	30
2.4 Modelagem matemática	33
2.4.1 Modelagem hidrológica	34
2.4.2 Modelagem hidráulica	37
2.5 Hidrograma Unitário (HU) e Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI).....	39
2.6 Aplicação do SIG em modelos hidrológicos	43
2.7 Software HEC-HMS	45
2.8 Software HEC-RAS	47
3 MATERIAL E MÉTODOS	49
3.1 Área de estudo	49
3.2 Caracterização do relevo da área de estudo.....	51
3.3 Discretização da BHAC	53
3.4 Caracterização geomorfológica das bacias hidrográficas	55
3.5 Monitoramento Hidrológico.....	60
3.5 Separação dos eventos.....	67
3.5.1 Hietogramas e Hidrogramas observados	67
3.5.2 Hidrogramas de escoamento superficial direto (ESD).....	68
3.5.3 Hietogramas de precipitação efetiva (P_e)	69
3.6 Modelagem hidrológica	72
3.6.1 Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark (HUIC)	72
3.6.2 Hidrograma Unitário Instantâneo Modificado de Clark (ModClark)	74
3.6.3 Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark (HUIC _{GEO}).....	74
3.7 Processamento computacional	78
3.8 Análise de desempenho das calibrações do CN e dos hidrogramas modelados	83
3.9 Modelagem hidráulica	84

3.9.1 Caracterização do canal principal: levantamento das seções topobatimétricas.....	84
3.9.2 Processamento computacional	86
3.9.3 Coeficiente de rugosidade.....	90
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	92
4.1 Características dos eventos chuva x escoamento analisados	92
4.2 Escoamento superficial direto (ESD) e Precipitação efetiva (P_e)	93
4.3 Modelagem hidrológica	94
4.3.1 Calibração do modelo.....	94
4.3.2 Parametrização para a modelagem concentrada (cenário 1) e modelagem semi-distribuída (cenário 2).....	97
4.4 Desempenho do modelo frente à estimativa de hidrogramas de ESD em relação às propostas geomorfológicas.....	103
4.5 Modelagem hidráulica	116
5 CONCLUSÕES	128
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	129
REFERÊNCIAS.....	131

1 Introdução

A água é essencial para a sustentabilidade do sistema da Terra, fundamental para as atividades humanas, bem como, no progresso econômico de uma região. Entretanto, o aumento populacional e dos padrões e expectativa de vida têm gerado maior demandas em relação a disponibilidade hídrica. Mikhailova *et al.* (2012) relatam que as mudanças climáticas, associadas às ações antrópicas e ao crescimento populacional, têm provocado alterações no regime hidrológico, influenciando na ocorrência de eventos extremos de precipitação. Isto resulta em inúmeros problemas relacionados a cheias em bacias hidrográficas, tornando o monitoramento hidrológico de suma importância para a gestão das mesmas, uma vez que problemas como esse têm causado expressivos prejuízos de caráter material, social e ambiental.

A Agência Nacional de Águas (ANA) é responsável pela rede de monitoramento e gerenciamento das informações hidrológicas no Brasil. Entretanto, esta funcionalidade atende apenas médias e grandes bacias hidrográficas, sendo que o monitoramento das pequenas bacias geralmente fica a cargo de empresas privadas e universidades. Os dados diários de vazão, adquiridos pelo monitoramento da ANA e a atualização do banco de dados dessas informações, não são condizentes com a periodicidade necessária para a aplicação em sistemas de alertas de enchentes e inundações. Perante à carência de monitoramento das bacias hidrográficas de pequeno porte e devido à atual discretização temporal das séries históricas de dados fluviométricos, têm-se estimulado cada vez mais o desenvolvimento de técnicas de estimativa de hidrogramas a partir de eventos de chuva intensa (BESKOW; SOUZA; LUZ, 2015; CALDEIRA *et al.*, 2015).

Inicialmente, foi proposto pelo engenheiro Le Roy K. Sherman (1932) uma técnica amplamente difundida para a estimativa do escoamento superficial direto e também para a obtenção das vazões de pico, sendo denominada de Hidrograma Unitário (HU). Este método baseia-se num comportamento linear e invariante no tempo, possibilitando avaliar a resposta de uma bacia a um dado evento de precipitação. Posteriormente, o modelo de HU foi aprimorado partindo do pressuposto de que a resposta da bacia seria independente da duração do evento,

fazendo referência a uma precipitação efetiva unitária instantânea, surgindo então o conceito de Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI).

Referente aos modelos de HUI, destacam-se o modelo desenvolvido por Clark, em 1945, e também o modelo modificado de Clark, proposto por Peters e Easton em 1996. Visto que as técnicas de HUI são dependentes de dados observados de chuva-vazão, os quais são de difícil obtenção, principalmente em pequenas bacias, Rodriguez-Iturbe e Valdéz (1979) propuseram uma versão geomorfológica do modelo, a qual poderia ser aplicado em bacias sem monitoramento.

Sendo assim, diversos autores vêm fazendo aproximações geomorfológicas dos modelos conceituais, onde os parâmetros de ajuste são obtidos a partir da caracterização física da bacia hidrográfica e da rede de drenagem (BHAGWAT, SHETTY; HEGDE, 2011; BHASKAR; PARIDA; NAYAK, 1997; SAHOO *et al.*, 2006; SWAIN *et al.*, 2015). De acordo com Hosseini *et al.* (2016), a ligação dos parâmetros geomorfológicos com as características hidrológicas da bacia hidrográfica pode fornecer uma maneira mais simples e precisa de entender seu comportamento hidrológico. Em relação ao modelo modificado de Clark, conhecido como ModClark, quando aplicado de maneira distribuída na bacia hidrográfica, oferece uma melhor abordagem para a simulação de hidrogramas de cheias (CHEN; CHEN; XU, 2007).

Tendo em vista a Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012, que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), que promove a adoção de medidas necessárias à redução dos riscos de desastre, por meio da identificação e avaliação das ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades a desastres, a modelagem computacional tornou-se ferramenta crucial para a elaboração de projetos hidráulicos, bem como nos sistemas de previsão e alertas de enchentes, exercendo grande influência nas tomadas de decisão e diminuindo os impactos causados por tais desastres naturais.

Partindo deste pressuposto, ressalta-se que a combinação de modelos hidrológicos e hidráulicos tem sido uma importante abordagem em estudos sobre enchente (MONTE *et al.*, 2016), pois os dados simulados pela modelagem hidrológica podem ser usados como dados de entrada na simulação dos perfis da superfície de água e cotas de cheias na modelagem hidráulica. Além disso, a utilização de geotecnologias, juntamente com os modelos hidrológicos e hidráulicos, dão contribuições importantes na otimização e visualização dos resultados (MONTE

et al., 2015), sendo que esses podem ser aplicados em sistemas de previsão e alerta de enchentes e inundações, podendo exercer influência nas tomadas de decisão e diminuir os impactos causados por tais desastres naturais.

1.1 Hipóteses

- As diferentes formulações geomorfológicas do HUI de Clark, em sua versão modificada, resultam, para um mesmo evento de chuva, em hidrogramas distintos e não podem ser consideradas como universais.
- As características da bacia hidrográfica possuem grande influência na aplicação das propostas geomorfológicas.
- Os resultados obtidos na modelagem hidrológica referente às proposta geomorfológicas apresentam grande influência nas simulações hidráulicas.

1.2 Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo geral avaliar uma ferramenta para estimativa de cotas de cheias, bem como a simulação da linha d'água de um trecho específico de uma bacia hidrográfica experimental localizada no sul do Rio Grande do Sul, originados em função de eventos extremos de chuva, combinando modelagem hidrológica via Hidrograma Unitário Instantâneo modificado de Clark, em sua versão geomorfológica, com modelagem hidráulica.

1.3 Objetivos específicos

- Verificar a aplicabilidade do HUI de Clark modificado em sua versão geomorfológica em relação a simulação dos hidrogramas de escoamento superficial direto, na bacia hidrográfica do arroio Cadeia.
- Avaliar diferentes formulações geomorfológicas existentes na literatura para a determinação dos parâmetros do HUI de Clark, em sua versão modificada, e indicar as mais recomendadas para estimar hidrogramas de cheias na bacia estudada.

- Avaliar o desempenho das modelagens de cotas de cheias das seções transversais em estudo, bem como da simulação do perfil longitudinal da linha d'água ao longo do canal principal, da bacia em análise, a partir das vazões máximas obtidas por meio da modelagem hidrológica e pelo coeficiente de rugosidade estimado para cada seção.

2 Revisão da Literatura

2.1 Bacia hidrográfica e ciclo hidrológico

Antigamente, o estudo da água era tratado como uma ciência descritiva e qualitativa. Contudo, após o desenvolvimento de pesquisas, tornou-se uma área de aplicação de métodos quantitativos, tais como metodologias matemáticas e estatísticas, que auxiliam nos resultados e conhecimento das informações existentes (TUCCI, 2009).

A água pode ser encontrada na atmosfera, na superfície terrestre, no subsolo, oceanos, mares e lagos, tanto no estado sólido, líquido ou gasoso. Essa constante movimentação é denominada de ciclo hidrológico (PINTO; HOLTZ; MARTINS, 1976). Tal ciclo, dispõe de elementos fundamentais, que estão ligados a dinâmica da água, sendo estes: precipitação, escoamento superficial direto, evapotranspiração, condensação, infiltração, interceptação, e interações entre esses componentes (RIGHETTO, 1998).

Segundo Tucci (2009), pode-se descrever o ciclo hidrológico a partir do aquecimento do ar presente na atmosfera, devido à radiação solar, que causa o processo de evaporação da água líquida e evapotranspiração das plantas, acarretando na formação das nuvens através do processo físico da condensação, que, por sua vez, podem resultar em precipitação. Parte da precipitação que fica retida no solo acaba retornando para a atmosfera através da evaporação e transpiração das plantas. Uma parte da água restante escoar sobre a superfície do solo, formando os cursos dos rios que deságuam em grandes volumes de água (mares, lagoas e oceanos), e a outra parte infiltra no solo abastecendo o lençol freático (PINTO; HOLTZ; MARTINS, 1976).

Vale ressaltar, que o ciclo hidrológico é considerado fechado a nível global, sendo que nem todo o volume de água precipitada nos continentes evapora, pois, uma parte se encaminha para rios e oceanos (Figura 1).

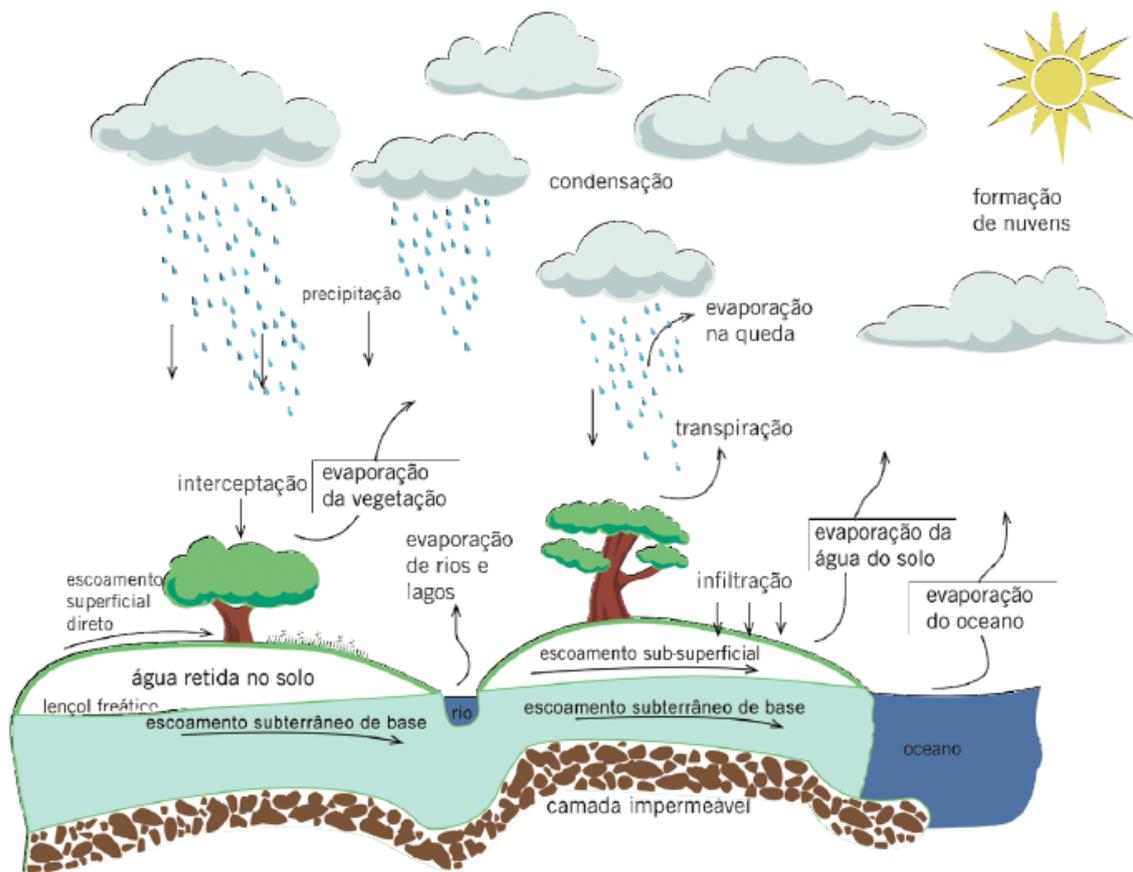


Figura 1 - Representação do ciclo hidrológico.
Fonte: Beskow *et al.* (2015).

Devido às complexidades envolvidas no estudo dos componentes do ciclo hidrológico em escala global, se faz necessário a delimitação de uma região de estudo em escala local. O modelo de gestão de recursos hídricos, instituído pela Lei 9.433/1997, estabelece a bacia hidrográfica como unidade de gestão territorial, sendo que a mesma, é considerada a unidade de paisagem fundamental responsável pela coleta e distribuição de água e sedimentos (ALTAF; MERAJ; ROMSHOO, 2013; OZDEMIR; BIRD, 2009).

Segundo Mello e Silva (2013), a bacia hidrográfica é uma área, definida topograficamente, de captação natural da água da precipitação, constituídas por uma rede de drenagem interligada, de tal forma que todo o escoamento é convergido para um único ponto de saída, denominado de exutório ou seção de controle.

Destaca-se que, além das ações antrópicas, as características físicas e bióticas de uma bacia hidrográfica exercem importante papel nos processos do ciclo hidrológico, influenciando, principalmente, a infiltração, o escoamento e a

evapotranspiração. Esses fatores propiciam o aumento da erosão, a ocorrência de cheias, a redução da recarga dos aquíferos e a disponibilidade de água nos mananciais (BESKOW; SOUZA; LUZ, 2015; TONELLO *et al.*, 2006).

2.2 escoamento superficial

O escoamento superficial é um processo do ciclo hidrológico muito importante para obras de engenharia, pois é nesta fase que ocorre o deslocamento das águas na superfície terrestre, sendo de extrema relevância nos estudos ligado ao aproveitamento da água superficial e a proteção contra os efeitos causados pelo seu deslocamento, tais como a erosão do solo e inundações (SILVA *et al.*, 2008).

O caminho tomado pelas águas ao atingir o solo é influenciado, principalmente, pela declividade do terreno e pelos obstáculos em seu trajeto. As águas escoam para as partes mais baixas do terreno, formando os cursos de águas, que, por sua vez, formam a rede de drenagem de uma bacia hidrográfica, que é entendida como o conjunto dos cursos de água desde os pequenos córregos até o rio principal (MARTINS, 1976).

Conforme Silva *et al.* (2008), existem três componentes do escoamento superficial que são de extrema importância para os estudos do deslocamento da água na superfície terrestre, no que se refere ao manejo de bacias hidrográficas, sendo esses: escoamento superficial direto (ESD), escoamento subsuperficial e o escoamento de base ou subterrâneo.

O escoamento subsuperficial ocorre nas camadas superiores do solo, sendo assim de difícil quantificação, por isso, muitas vezes seu estudo é realizado junto ao ESD (MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010), mesmo possuindo uma taxa de drenagem mais lenta (MELLO; SILVA, 2013). Já o escoamento de base é originado pela drenagem subterrânea, sendo um elemento muito importante durante a estiagem, no ponto de vista ambiental, pois é responsável por alimentar o curso de água (TUCCI, 2009; MARTINS, 1976).

O ESD se sucede com mais periodicidade quando ocorrem precipitações mais intensas, que acabam resultando na saturação do solo e, por sua vez, cessando a capacidade de infiltração total da água. Esse processo acaba impulsionando a formação do escoamento da parcela restante da precipitação sobre o solo, podendo acarretar na geração de cheias. Este escoamento, conforme Tucci

(2009) e Pruski, Brandão, Silva (2003), tem grande peso no dimensionamento de obras hidráulicas (barragens, terraços, bacias de contenção) e controle de erosão hídrica, sendo que o mesmo é conhecido como precipitação efetiva (P_e) ou deflúvio superficial.

2.3 Eventos hidrológicos extremos

Conforme Londe *et al.* (2014) e Ryu *et al.* (2016), os eventos extremos relacionados aos recursos hídricos normalmente estão associados ao excesso ou escassez de água, fatos esses que podem impulsionar em desastres ambientais, tais como secas e inundações, rompimentos de barragens, estiagens, dificuldades no abastecimento de água potável e impactos na agricultura, além de gerar grandes prejuízos econômicos e sociais, prejudicando a qualidade de vida da população.

Os constantes episódios de inundações em grandes centros, na maioria das vezes, estão relacionados ao aumento populacional e ao crescimento urbano desordenado. Isso ocorre, devido à inexistência de controle do espaço urbano, causando efeitos sobre a infraestrutura de água, como: abastecimento, esgotamento sanitário, drenagem urbana e resíduos sólidos (TUCCI; BERTONI, 2003). Outro fator que influencia na ocorrência das inundações são os eventos naturais, que ocorrem com regularidade nos cursos de água, devido ao contínuo evento de chuvas intensas (AMARAL; RIBEIRO, 2012).

Conforme Tucci (2008), os cursos de água possuem dois leitos principais: o leito menor e o leito maior. No leito menor, as águas escoam na maioria do tempo, sendo considerado como o nível de normalidade dos leitos fluviais. Já o leito maior refere-se à superfície acima do nível médio das águas, sendo regularmente inundada em ocasiões de cheias. A representação dos dois leitos do rio pode ser observada na Figura 2.

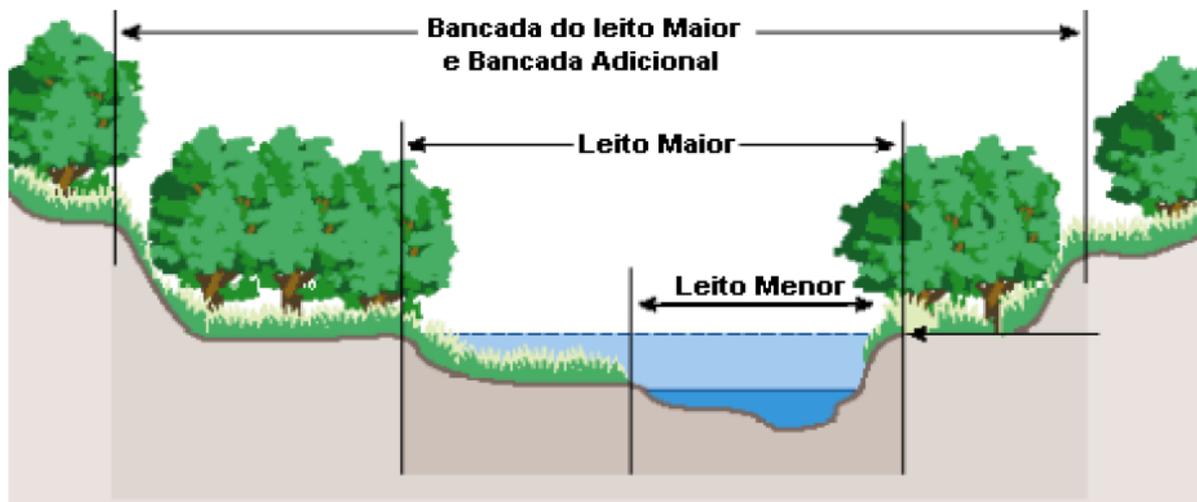


Figura 2 - Representação dos leitos principais de um curso de água.
Fonte: Adaptado de Bichana (2006).

Conforme Tominaga, Santoro e Amaral (2009), as cheias ocorrem quando há o aumento do nível d'água no canal de drenagem da bacia, devido ao aumento da vazão, atingindo a cota máxima, ou seja, o leito maior, porém, sem transbordamento. O transbordamento representa as inundações, onde as águas atingem as áreas marginais, conhecidas como planície de inundação ou área de várzea. Já o acúmulo de água nos perímetros urbanos, são determinados como alagamentos, onde muitas vezes ocorrem devido a problemas de drenagem.

A tendência crescente de desastres naturais está relacionada, principalmente, ao crescimento populacional e ocupação de áreas de risco (várzea e costeiras), além dos efeitos das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico (BRUNDA; NYAMATHI, 2015). Nos últimos anos, 90% dos desastres têm sido relacionadas com as condições climáticas e os tipos de desastres naturais mais frequentes no Brasil foram as inundações, com 59% dos registros totais (BRUNDA; NYAMATHI, 2015; MARCELINO, 2003).

A ocorrência de inundações nas áreas urbanas e rurais vem aumentando gradativamente no mundo todo, principalmente devido às ações antrópicas e às mudanças climáticas, que, por sua vez, acabam afetando a intensidade das chuvas e, conseqüentemente, na geração do ESD (ARAGÃO *et al.*, 2013). Conforme Wei *et al.* (2007) e Santos, Nori e Oliveira (2010), no meio rural as chuvas intensas e as inundações removem o solo superficial, reduzindo a capacidade produtiva do solo, além de transportar os sedimentos para os corpos hídricos, comprometendo a sua

qualidade e capacidade de armazenamento, enquanto que no meio urbano, esses processos podem levar à destruição de bens e a até perdas humanas.

Com relação à distribuição espacial de desastres naturais, mais de 60% dos casos se sucedem nas regiões Sudeste e Sul. Isto ocorre, pois, nessas regiões, as instabilidades atmosféricas são frequentes devido à passagem de frentes frias no inverno, da ocorrência de complexos convectivos de mesoescala na primavera e da formação dos sistemas convectivos no verão, que desencadeiam as chuvas intensas e concentradas para essa estação (MONTEIRO; FURTADO, 1995; SANT'ANNA NETO, 1995; SILVA DIAS, 1996; MARCELINO, 2003; NASCIMENTO, 2005).

O Relatório de Conjuntura da Agência Nacional de Águas – ANA de 2016 (ANA, 2016) relata que em 2015, foram publicados 212 decretos de situação de emergência (SE) ou estado de calamidade pública (ECP) devido à ocorrência de cheias, em 195 municípios brasileiros. Dentre estes eventos registrados o mais frequente foi o de inundações. Dos 195 municípios atingidos por cheias, 64 estão no estado do Rio Grande do Sul, 46 no Amazonas e 40 em Santa Catarina. O município que teve o maior número de registros de cheias foi Uruguaiana, no Rio Grande do Sul, com 3 registros, sendo 2 relativos a inundações e 1 a enxurrada. A Figura 3 ilustra os eventos registrados de cheias no Brasil, em que o destaque está na região sul com o maior número de municípios atingidos.

Ressalta-se, que estudos de inundações são pouco utilizados nos países em desenvolvimento, especialmente para médias e pequenas bacias. Assim, em uma região propensa a inundações, a rápida e precisa previsão é imprescindível. Dessa maneira, o monitoramento hidrológico de uma bacia hidrográfica se torna de suma importância para o sucesso da implementação da gestão de inundação e mitigação em uma bacia hidrográfica, sendo que, para isso é necessário a obtenção das variáveis nível d'água e vazão (HAO *et al.*, 2015).

Atualmente, métodos hidrológicos e hidráulicos têm sido cada vez mais aplicados em estudos de cheias, auxiliando no estudo e compreensão de eventos extremos, fato este que vem servindo de subsídio no gerenciamento das bacias hidrográficas (CRISS; WINSTON, 2008).

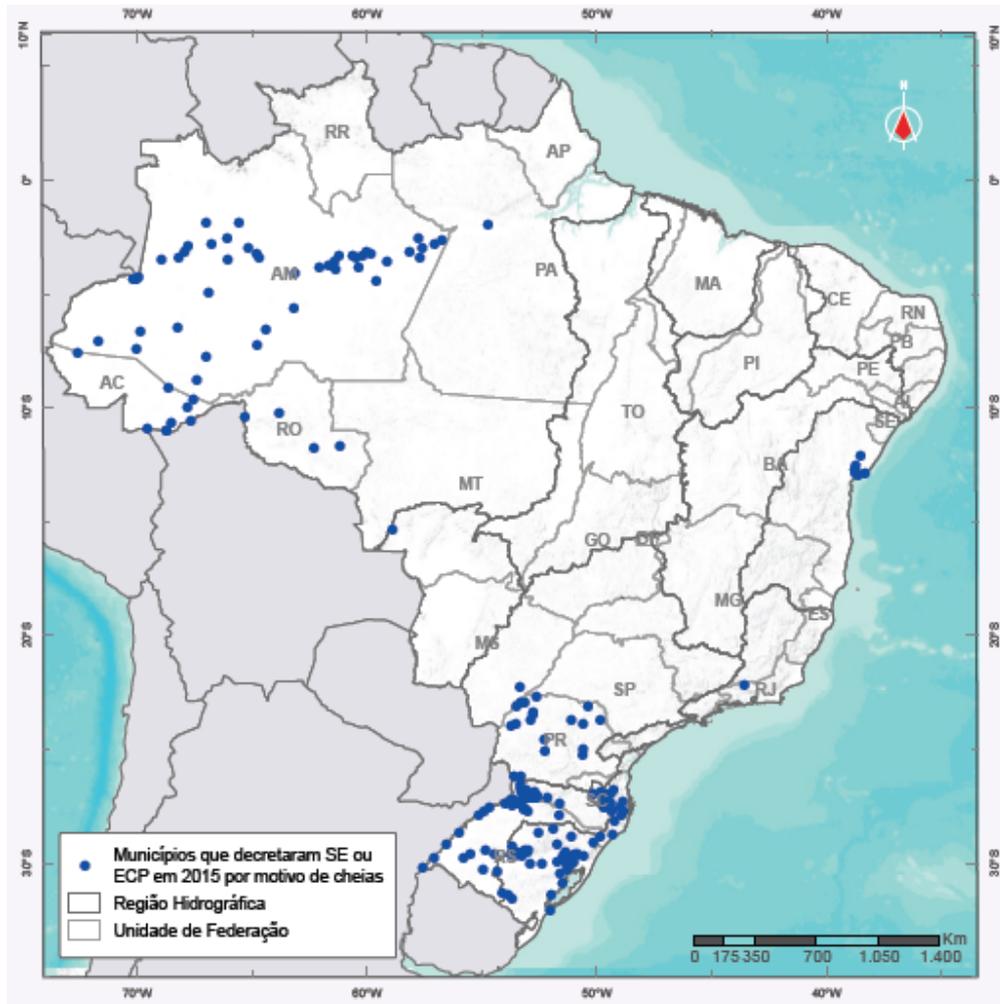


Figura 3 - Eventos críticos de cheias no Brasil no ano de 2015.
Fonte: ANA (2016).

2.4 Modelagem matemática

Christofoletti (1999) relata que a modelagem é uma representação simplificada do mundo real ou de um dos seus aspectos, capaz de melhorar o conhecimento sobre o determinado evento em estudo e o seu contexto no mundo físico. Conforme Campos (2009), um modelo é a representação do comportamento de um sistema, e pode ser classificado como físico, analógico ou matemático.

Os modelos físicos representam o sistema por uma estrutura menor, a qual tem comportamento semelhante à estrutura em análise, sendo que a escala do modelo é feita em termos de adimensionais importantes ao fenômeno, por exemplo: estruturas com escoamento turbulento. Os modelos analógicos, utilizam analogias entre equações que regem fenômenos diferentes, por exemplo: circuitos hidráulicos e circuitos elétricos. Estes modelos são poucos usados. Já os modelos matemáticos

representam a natureza do sistema por meio de equações matemáticas que regem os processos no sistema (CAMPOS, 2009).

A modelagem matemática ou modelagem computacional tem evoluído significativamente devido a capacidade e a velocidade de processamento dos computadores, que permitem a manipulação de grande quantidade de dados, além da realização de séries de cálculos com grande velocidade e precisão. Desde então, o uso do modelo computacional teve uma arrancada significativa, o que permitiu o desenvolvimento e aplicação em diversas áreas, principalmente na área da modelagem hidráulica-hidrológica.

2.4.1 Modelagem hidrológica

O ESD em uma bacia hidrográfica, conforme Ryu *et al.* (2016), pode ser estimado por meio do monitoramento da vazão ou pela utilização de modelos chuva-vazão. O monitoramento da vazão é mais preciso do que a utilização de modelos computacionais, no entanto, devido à falta de recursos financeiros e de mão de obra adequada, a medição dessa variável torna-se difícil. Além disto, para a gestão sustentável das bacias hidrográficas, a previsão de futuras mudanças do clima e do manejo do solo deve ser considerada.

No Brasil, a rede de monitoramento e gerenciamento de informações hidrológicas é constituída de poucos postos hidrológicos e, geralmente, com séries de curta duração, que abrange apenas médias e grandes bacias (COSTA *et al.*, 2012). Os modelos hidrológicos surgiram devido à necessidade de obtenção de séries hidrológicas mais longas e representativas de vazões, uma vez que, as séries de chuva são geralmente mais longas que as séries de vazão. Dessa maneira, utilizando os dados de chuva, é possível estimar as vazões desconhecidas para as bacias hidrográficas em análise (SARAIVA; FERNANDES; NAGHETTINI, 2011). Por estas razões, os modelos chuva-vazão em escala de bacias hidrográficas têm sido amplamente utilizados para a gestão de planos de hidrologia e meio ambiente.

O processo de utilização de um modelo, é denominado como simulação. Sendo assim, considerando a bacia hidrográfica como um sistema, pode-se entender a simulação chuva-vazão como a aplicação de um modelo hidrológico matemático para sua representação, simulando o escoamento pela quantificação da vazão, dado um evento climático (CALDEIRA, 2016).

Conforme Rennó e Soares (2007), os modelos hidrológicos matemáticos podem ser classificados sob diferentes aspectos: a) tipo de variável: estocásticos ou determinísticos; b) relação entre as variáveis: empíricos ou conceituais c) forma de representação dos dados: discretos ou contínuos; d) existência de dependência temporal: estacionários ou dinâmicos e e) existência ou não de relações espaciais: concentrados ou distribuídos.

Um modelo hidrológico é dito estocástico quando aborda em sua formulação conceitos de probabilidade, ou seja, quando a chance de ocorrência de uma variável é considerada, caso contrário, é dito determinístico (VIOLA, 2011). Tucci (2005), relata que os modelos são ditos conceituais quando as funções empregadas para representar o comportamento do sistema levam em consideração os processos físicos e empíricos quando não consideram estes processos.

Com relação à forma de representação dos dados, os modelos hidrológicos podem ser classificados como discretos ou contínuos. Os discretos objetivam a modelagem de períodos isolados de uma série histórica, buscando representar eventos de cheia ou recessão, enquanto que os contínuos objetivam a modelagem de longos períodos, geralmente contemplando diferentes comportamentos hidrológicos (MARINHO FILHO *et al.*, 2012).

Já em relação a existência de dependência temporal, os modelos hidrológicos podem ainda ser estacionários, descrevendo o fenômeno, em determinado momento, sem variação temporal dos parâmetros, ou dinâmicos para os quais os parâmetros variam em função do tempo (MARINHO FILHO *et al.*, 2012).

Conforme Rennó (2003), os fenômenos naturais que envolvem o ciclo hidrológico variam continuamente no tempo e no espaço, no entanto, sua representação através de modelos matemáticos requer um grau de discretização. A discretização espacial está relacionada à área na qual as variáveis são consideradas homogêneas podendo classificar o modelo como concentrado ou distribuído.

Nos modelos hidrológicos com abordagem concentrada, cada variável assume um valor que representa homogeneamente a bacia em análise, o que limita a representação da variabilidade espacial das características da bacia (HARTMANN; BALES; SOROOSHIAN, 1999). O mesmo não ocorre em modelos com abordagem distribuída, haja visto, que a bacia hidrográfica é subdividida em sub-bacias (modelo semi-distribuído) ou em módulos (modelo distribuído), o que proporciona descrição

mais acurada da variabilidade espacial e das variáveis de entrada (COLLISCHONN, 2001). A Figura 4 ilustra a estrutura da discretização do modelo.

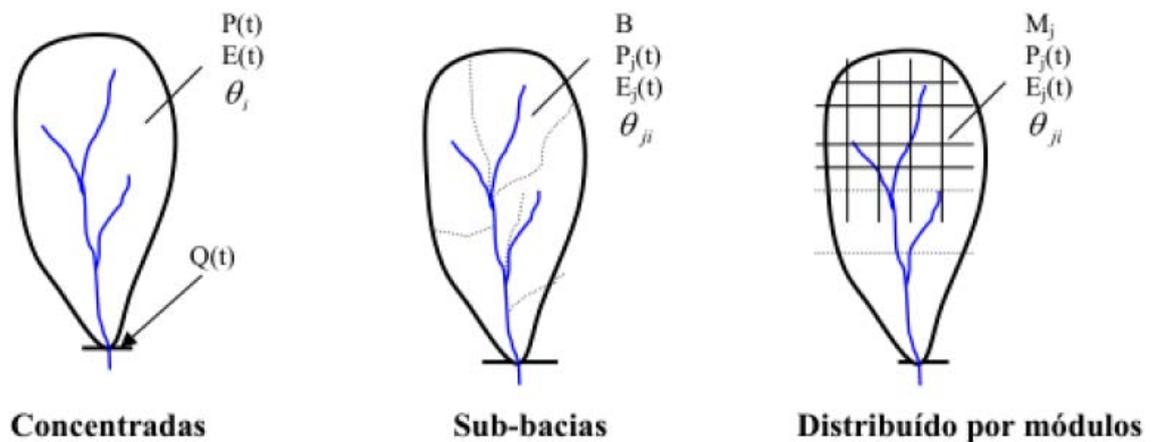


Figura 4 – Estrutura de discretização.
Fonte: Tucci (2005).

Onde $P(t)$ é a precipitação no instante t , $E(t)$ é a evaporação no instante t , e $Q(t)$ é a vazão no instante t , sendo estas as variáveis temporais de entrada, comumente empregadas em modelos hidrológicos chuva-vazão. Já as constantes B , M , θ_i e j representam a sub-bacia, o módulo da bacia, a declividade da bacia e a unidade de análise (sub-bacia ou módulos), respectivamente.

De acordo com Maidment (1993), essas variáveis de entrada, por serem obtidas por monitoramento, geralmente são observadas em intervalos de tempo pré-definidos, não sendo conhecidas suas variações entre observações, o que implica na aceitação de uma variação média no intervalo. Sendo assim, tanto no modelo concentrado, semi-distribuído ou distribuído, a bacia é representada por um evento de precipitação média.

No modelo semi-distribuído, a divisão da bacia em sub-bacias se sucede de acordo com os canais de drenagem do sistema. Esta subdivisão é feita em função dos dados disponíveis, locais de interesse e variabilidade dos parâmetros físicos da bacia. No modelo distribuído por módulos, a discretização é feita através de formas geométricas como quadrados, retângulos, triângulos, sem relação direta com a forma da bacia, mas caracterizando internamente os componentes dos processos (TUCCI, 2005).

Como as bacias hidrográficas possuem grande variabilidade espacial, devido ao relevo, a pedologia, cobertura vegetal, sua geologia, a variabilidade do comportamento da bacia em relação aos usos possíveis do solo são diversas. Nesse sentido, os modelos semi-distribuídos e distribuídos tentam relatar a bacia hidrográfica através de uma discretização mais detalhada, introduzindo as melhores formulações obtidas em cada processo hidrológico, estabelecendo relações entre os parâmetros e as características físicas das bacias (CHEN; CHEN; XU, 2007; TUCCI, 2005).

Para o planejamento e a gestão de recursos hídricos são utilizados modelos hidrológicos para compreender o comportamento de escoamento em uma bacia hidrográfica. Salienta-se que, para bacias hidrográficas com dados limitados, a escolha de modelo e dos seus parâmetros de identificação é considerada uma etapa importante para a estimativa de hidrogramas de escoamento direto (AHMAD; GHUMMAN; AHMAD, 2010), visto que o objetivo é sempre alcançar melhores simulações de vazão (HAO *et al.*, 2015).

2.4.2 Modelagem hidráulica

O trecho fluvial de uma bacia hidrográfica normalmente consiste de um canal principal, pelo qual escoam grande parte da vazão, e duas áreas de várzea adjacentes, denominadas como planície de inundação. Quando o volume de uma onda de cheia excede a capacidade da calha principal do rio em decorrência de chuvas intensas, ocasiona a inundação das várzeas. A planície de inundação pode atuar como área de armazenamento ou permitir fluxos independentes do canal principal que podem ou não retornar ao mesmo de acordo com as características do relevo ou formas de ocupação humana (COUTINHO, 2015).

Nas últimas décadas, diversos modelos numéricos foram desenvolvidos voltados para a simulação de cheias e inundações. Conforme Coutinho (2015), os pacotes de modelos de simulações hidráulicas, disponíveis atualmente, representam os escoamentos nos rios e planície de inundação de três formas: escoamento unidimensional (1D), escoamento bidimensional (2D) e modelos integrados 1D/2D. A abordagem mais comumente empregada são os modelos hidráulicos que utilizam as equações do escoamento unidimensional, ou seja, quando a direção e a intensidade da velocidade do escoamento são as mesmas em todos pontos da área em estudo

(COUTINHO, 2015), ao contrário do escoamento bidimensional, onde as grandezas do escoamento variam em duas dimensões.

Canholi (2005) relata que a modelagem hidráulica pode ser realizada considerando um regime permanente (escoamento uniforme) ou um regime não permanente (escoamento variado). O regime permanente é aquele em que a velocidade local em um ponto qualquer da corrente permanece invariável no tempo, em módulo e direção. Por isso, os parâmetros hidráulicos (profundidade, vazão, área molhada, entre outros), em uma mesma seção transversal, são constantes no tempo (PORTO, 2006). Por possuir um equacionamento simples, este modelo forma a base para o cálculo do escoamento em canais (CANHOLI, 2005). Já o regime não permanente é aquele em que a velocidade em um ponto varia ao longo do tempo, dessa maneira, não existe uma continuidade de vazão, e as características do escoamento dependem da posição do ponto considerado e do tempo. Este tipo de escoamento ocorre quando, geralmente, se tem uma passagem de cheia através de um canal (PORTO, 2006).

Dentre os modelos de cheia e inundação mais empregados nas simulações hidráulicas se encontra o modelo do tipo seção composta. O estudo de cheias por este tipo de modelo leva em consideração seções transversais traçadas ao longo do canal principal, sendo que, a planície de inundação é considerada como um prolongamento da seção transversal, tornando-se possível modelar a velocidade do escoamento na mesma (CUNGE; HOLLY; VERWEY, 1980). A vazão total na seção transversal é a soma da vazão do canal principal e da vazão na planície de inundação, que podem ser calculadas através da equação de Manning (COUTINHO, 2015), considerando um escoamento uniforme entre as seções (GRIBBIN, 2013). Esse tipo de representação é a mais empregada nas simulações de cheias e inundações, pois a maioria dos softwares de modelagem hidráulica utilizam o conceito de repartição das seções transversais e a equação de Manning.

Diante da necessidade de simular as cotas de cheias referente a cada seção transversal em análise, torna-se fundamental a integração da modelagem hidrológica com a modelagem hidráulica. A partir da modelagem hidrológica é possível obter os hidrogramas de cheias referente a cada seção, que servem como dados de entrada no modelo hidráulico, além do coeficiente de rugosidade e dos parâmetros geométricos mensurados da seção. Com base na simulação das cotas de cheias entre as seções, é possível realizar a simulação do perfil longitudinal da

linha d'água do canal em estudo, sendo essa informação de extrema importância em estudos voltados para a prevenção, controle e alertas de cheias. Armas, Beilicci e Beilicci (2017) e Rezaie *et al.* (2014) evidenciam estudos que utilizam da modelagem hidráulica para simular o perfil longitudinal da linha d'água do rio Baroalt e dos sistemas fluviais do Ganges-Brahmaputra-Meghna (GBM), respectivamente.

2.5 Hidrograma Unitário (HU) e Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI)

O método do Hidrograma Unitário (HU), inicialmente proposto por Sherman em 1932, é um dos métodos mais tradicionais e de fácil utilização para transformar a precipitação efetiva em vazões de escoamento superficial direto (BHUYAN *et al.*, 2015; CARVALHO; CHAUDRHY, 2001). Neste método, a precipitação observada e os dados de escoamento correspondentes são utilizados para deduzir o hidrograma unitário por um período específico de chuva (LEE; YEN, 2000).

O HU pode ser definido com um gráfico de tempo de descarga de uma unidade de volume de escoamento superficial direto oriundo de uma precipitação efetiva distribuída uniformemente, com uma intensidade uniforme ao longo de um período determinado (STRAUB; MELCHING; KOCHER, 2000). Sendo assim, Sule e Alabi (2013), afirmam que o HU é uma ferramenta primordial para estudos hidrológicos, pois predizem as descargas de cheias e também determinam a resposta do escoamento superficial direto frente à precipitação.

Vale ressaltar, que este modelo se refere ao hidrograma resultante de uma precipitação unitária (P_u), com intensidade constante no tempo e uniformemente distribuída sobre a área de drenagem da bacia (AGIRRE; GOÑI; GIMENA, 2005). Como é considerado que a bacia hidrográfica possui um comportamento linear, podem ser aplicados os princípios da proporcionalidade e da superposição sob o modelo. Com a teoria do HU é possível calcular a resposta da bacia a eventos diferentes de precipitação, considerando que a resposta final é uma soma das respostas individuais (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Sendo assim, o princípio da proporcionalidade (Figura 5) considera que para uma P_e com uma certa duração (D), o volume de P_e que é igual ao volume de ESD, é proporcional à intensidade dessa precipitação. Como os hidrogramas de ESD correspondem a $P_{e's}$ de mesma duração, e têm o mesmo tempo de base, considera-se que as ordenadas dos hidrogramas serão proporcionais à intensidade da P_e . Já o

princípio da superposição (Figura 6) considera que as vazões de um hidrograma de ESD, as quais são formadas por P_e sucessivas, podem ser obtidas somando as vazões dos hidrogramas de ESD correspondentes às P_e individuais (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

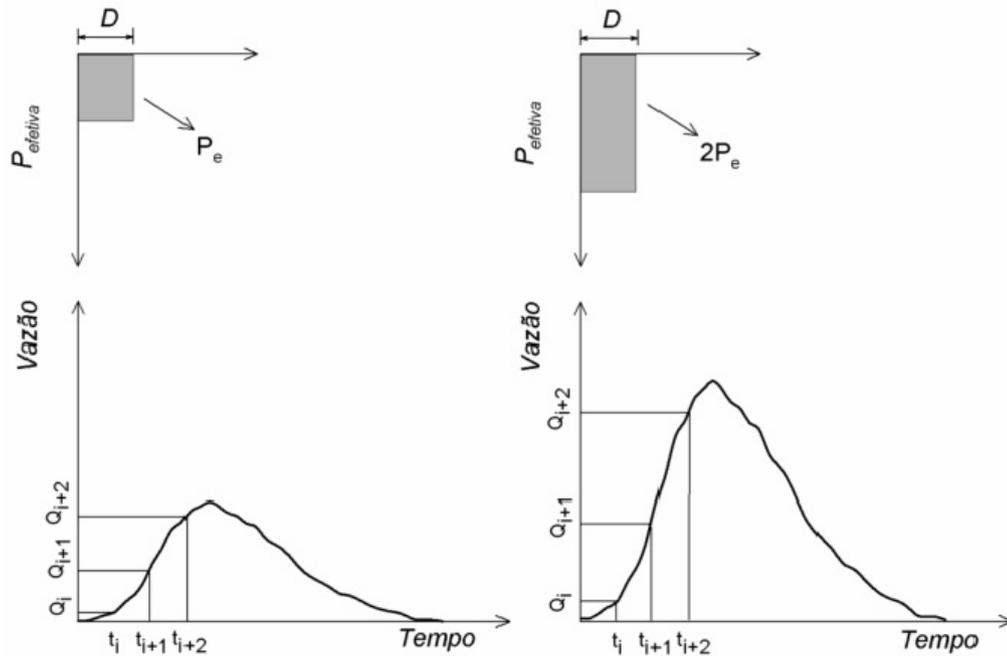


Figura 5 – Princípio da proporcionalidade na teoria do HU.
Fonte: Nunes (2015).

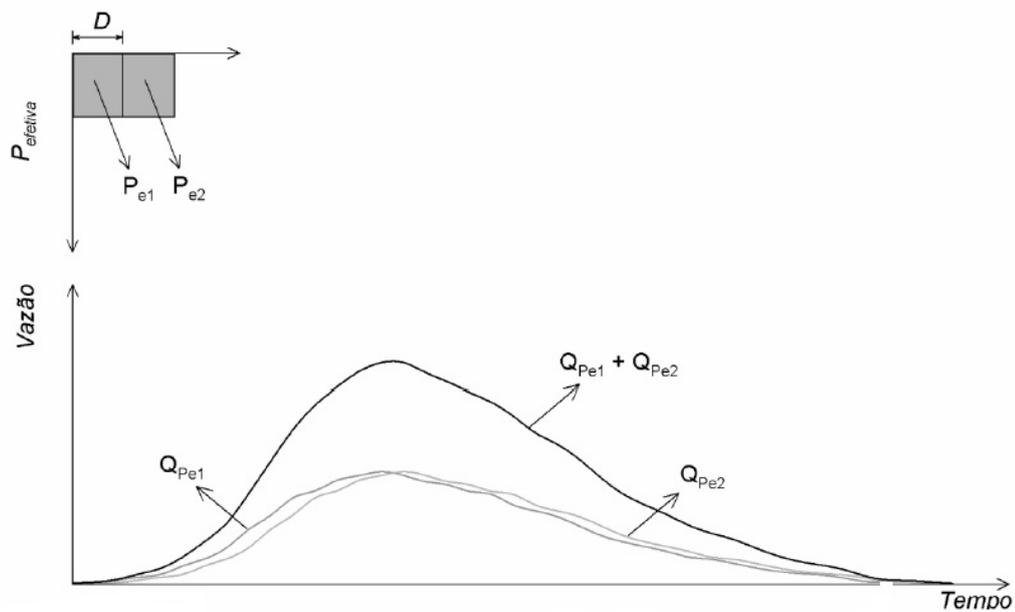


Figura 6 – Princípio da superposição na teoria do HU.
Fonte: Nunes (2015).

De acordo com Mello e Silva (2013), empregando os princípios da proporcionalidade e da superposição, é possível calcular, a partir do HU, os hidrogramas resultantes de eventos complexos, através do cálculo de uma integral de convolução (Equação 1).

$$Q(t) = \int_0^t P(\tau) \cdot \mu(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

Onde $Q(t)$ é a vazão do escoamento superficial no intervalo de tempo t em $m^3 \cdot s^{-1}$; P a precipitação efetiva no intervalo t em mm ; e $\mu(t)$ a ordenada do HU na saída da bacia hidrográfica no tempo t .

Porém, a aplicação da teoria da linearidade adotada pelos HU requer um grande número de parâmetros calibráveis, limitando-se apenas para bacias monitoradas. Dessa maneira, visando suprir a falta de dados, surgiram os Hidrogramas Unitários Sintéticos (HUS), cuja finalidade era ampliar a aplicação teórica do HU para bacias hidrográficas não monitoradas, relacionando a forma do HU com as características fisiográficas da bacia através de equações empíricas (JENA; TIWARI, 2006). Estes modelos também são conhecidos como modelos geomorfológicos.

Em 1938, Snyder desenvolveu o primeiro trabalho científico acerca de HU geomorfológico, com base em dados de bacias monitoradas na região dos Apalaches (Estados Unidos). O modelo desenvolvido é baseado na determinação do tempo entre centro de massa do hietograma de precipitação efetiva e a vazão de pico unitária e na estimativa da vazão de pico e da duração total do escoamento.

Outros métodos de HU sintéticos muito conhecidos na literatura são o Triangular e o Adimensional, desenvolvidos na década de 70 pelo Soil Conservation Service (SCS), atual Natural Resources Conservation Services (NRCS) do United States Department of Agriculture (USDA). Nourani, Singh e Delafrouz (2009), relatam que estes métodos são bastante simplificados e suas relações foram derivadas de um grande número de HU's obtidos para bacias hidrográficas americanas de diferentes tamanhos e localidades geográficas.

Em 1945, Clark introduziu a ideia do Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI), definindo que a resposta da bacia seria independente da duração, se referente a uma

chuva unitária instantânea, conhecida em termos matemáticos como um pulso unitário instantâneo (CHOW, 1964). O método do HUI de Clark baseia-se em duas etapas. A primeira etapa consiste na distribuição da superfície da bacia em subáreas, facilitando o cálculo do volume de água em cada uma dessas áreas, sendo que o total escoado superficialmente ao longo da bacia flui para a mesma saída (exutório) (PAUDEL, 2009; SANCHEZ, 2011). Sendo assim, a bacia hidrográfica é dividida em várias áreas com o mesmo tempo de viagem de água precipitada e essas áreas são delimitadas a partir da observação das curvas de nível da bacia (PORTO; ZAHED FILHO; MARCELLINI, 1999). Estes dados são utilizados para determinar um histograma de tempo de descarga (vazão). O histograma de tempo de descarga é então roteado através de um reservatório linear para dar conta do armazenamento da bacia hidrográfica (PAUDEL; NELSON; SCHARFFERNBERG, 2009), concluindo a segunda etapa do método.

Peters e Easton (1996) desenvolveram um modelo de HUI baseado na técnica de Clark, o qual foi denominado de ModClark, sendo um histograma que acomoda dados de precipitação total espacialmente distribuídos (BHATTACHARYA *et al.*, 2012). O método ModClark é um método diferente do modelo de Clark, pois considera a discretização espacial da bacia hidrográfica por módulos, onde um grid uniforme é sobreposto na bacia (PAUDEL; NELSON; SCHARFFERNBERG, 2009). A precipitação líquida de cada célula do grid é destinada para o exutório da bacia hidrográfica e encaminhada para um reservatório linear. As saídas do reservatório linear são somadas e os fluxos de base são adicionados para obter um histograma de escoamento total (BHATTACHARYA *et al.*, 2012).

Considerando que estes métodos são dependentes de dados observados de chuva-vazão e dada a problemática acerca da disponibilidade dos mesmos, foram desenvolvidas versões geomorfológicas dos HUI. Em 1979, Rodriguez-Iturbe e Valdés introduziram o conceito do Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUI_{GEO}), o qual inclui quantitativamente o efeito da geomorfologia da rede de drenagem na teoria do HUI, criando uma relação direta entre a geomorfologia da bacia e sua resposta hidrológica a partir de mecânica estatística.

Partindo deste pressuposto, o HUI_{GEO} é interpretado como uma função densidade de probabilidade do tempo gasto por uma gota de chuva até atingir o exutório da bacia, função esta que depende da geomorfologia. A geomorfologia introduzida no HUI_{GEO} é obtida através das características da bacia, como área,

comprimento do curso principal e declividade (RODRIGUEZ-ITURBE; VALDÉS, 1979). Conforme Jain e Sinha (2003), o HUI_{GEO} possui uma boa estimativa da resposta hidrológica da bacia hidrográfica, proporcionando uma compreensão de sua variabilidade espaço-temporal.

Ghumman *et al.* (2011) relatam que, devido ao grande desenvolvimento de ferramentas de processamento de dados e imagens de satélite, o HUI_{GEO} passou a ser muito aplicado para prever hidrogramas na seção de controle de bacias hidrográficas, pois, segundo Carvalho e Chaudrhy (2001), a metodologia geomorfológica possui grande potencial para ser utilizada em bacias sem monitoramento hidrológico, fato este, evidenciado em bacias de pequeno e médio porte no Brasil.

2.6 Aplicação do SIG em modelos hidrológicos

Coforme Cysne (2004), os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) podem ser interpretados como ferramentas de armazenamento, manipulação e análise de fenômenos geográficos. O SIG é um conjunto de tecnologias integradas que busca coletar, tratar, visualizar e gerenciar informações georreferenciadas (informações atreladas a um sistema de coordenadas geográficas) de diversas áreas do conhecimento.

Os SIG's, são softwares acoplados de ferramentas que possibilitam a eliminação da dificuldade de obtenção da descrição espacial detalhada da região de estudo, além de possuírem a capacidade de gerar um banco de dados espaciais e de processamento dessas informações (FAN; COLLISCHONN, 2014). Além disso, os ambientes SIG's também permitem descrever a complexidade dos processos ambientais em diversos níveis de relação, sendo estes: simplificação, generalização e abstração. Estes fatores, possibilitam a integração dos diferentes elementos formadores da paisagem que contribuem para a modelagem do relevo (CHRISTOFOLETTI, 1980; FERRAZ; SÁFADI; LAGE, 1999).

Maidment (2002) relata que o SIG começou a se desenvolver durante os anos 90, e desde então vem se tornando uma ferramenta vital na montagem de informações sobre recursos hídricos, pois permitem a integração dos dados que caracterizam a variabilidade espacial da bacia em um único sistema. Conforme Santos e Silva (2007), a ligação entre modelos hidrológicos e o SIG se estabelece

em uma ferramenta que permite a integração entre os elementos espaciais, sociais, bióticos e físicos, permitindo simulações da resposta da bacia hidrográfica referente aos eventos de chuva, levando em consideração as características físicas da mesma.

Um importante exemplo da utilização do SIG é para a delimitação de uma bacia hidrográfica, sendo que este é um dos primeiros e mais comuns procedimentos executados em análises hidrológicas. Para isso, é comum a utilização de informações de relevo em formato digital, como mapas e cartas topográficas (MENDES; CIRILO, 2001). Um outro exemplo importante da utilização do SIG é em Modelos Digitais de Elevação (MDE), que são modelos que consideram como principal característica a elevação do terreno (GUEDES; SILVA, 2012). De acordo com Oliveira e Maidment (1999), a partir do modelo digital de elevação, características hidrológicas do terreno (direção de fluxo, acúmulo de fluxo, comprimento de fluxo, rede de drenagem e áreas de drenagem) podem ser determinadas.

Conforme Fan e Collischonn (2014), é impossível a não utilização de uma plataforma SIG na elaboração de modelos distribuídos. Quando a bacia hidrográfica é caracterizada por um conjunto de módulos, onde cada um possui uma propriedade hidrológica específica, os modelos conceituais baseados, principalmente, na topografia da bacia são muito mais eficientes se estiverem acoplados com técnicas de SIG, o que facilita a espacialização das variáveis de entrada dos modelos (BEVEN, 2004; GREEN *et al.*, 2006; STACKELBERG *et al.*, 2007).

Salienta-se que em muitas regiões onde os modelos chuva-vazão são necessários, existe uma falta de dados de vazão para calibrar os parâmetros dos modelos. Nesse caso, a geomorfologia da bacia pode ser estudada para determinar a resposta do escoamento direto. Geomorfologia reflete a topografia e as propriedades da bacia e sua rede de drenagem (SARANGI *et al.*, 2007). Sendo assim, as ferramentas de SIG se tornam extremamente fundamentais (GIBBS; DANDY; MAIER, 2010). Estudos realizados por Nguyen, Maathuis e Rientjes (2009), Ahmad, Ghumman e Ahmad (2009) e Sadeghi, Mostafazadeh e Soddodin (2015), evidenciam exemplos de aplicação de SIG na modelagem chuva-vazão.

2.7 Software HEC-HMS

Devido ao avanço tecnológico e a maior disponibilidade de dados hidrometeorológicos, a modelagem hidrológica tem sido amplamente desenvolvida e tem originado diversos modelos, variando de acordo com os objetivos e a escala de aplicação, desde modelos voltados para o dimensionamento de reservatórios até modelos cujo objetivo é prever alterações nas vazões de uma bacia devido a mudanças climáticas (BEVEN, 2004; MARINHO FILHO *et al.*, 2012). Alguns exemplos de modelos que vêm sendo amplamente utilizados são: SWAT (Soil and Water Assessment Tool) e LASH (Lavras Simulation of Hydrology), para simulações de longos períodos de dados; LISEM (Limburg Soil Erosion Model) e HEC-HMS (Hydrological Engineering Center - Hydrologic Modeling System), para simulações de eventos isolados de chuva, tais como aqueles baseados da teoria do HU (MOURA, 2018).

O sistema de modelagem hidrológica HEC-HMS é um software gratuito que foi desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (HEC) do corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE). O software HEC-HMS teve seu modelo 1.0 criado em 2000, sendo um substituto único de versões anteriores especializadas do HEC-1, criado em 1968.

O software HEC-HMS foi criado para simular o processo de transformação chuva-vazão em bacias hidrográficas grandes ou pequenas, rurais ou urbanas (SCHARFFENBERG, 2015). As ferramentas para estimação de parâmetros com a otimização foram muito mais flexíveis do que em programas anteriores. Atualmente o software está na versão 4.2.1 e, assim como a versão 1.0, as demais versões do programa introduziram melhorias sobre o software (SCHARFFENBERG, 2015).

Conforme Bajwa e Tim (2002), o software é considerado analítico, pois realiza cálculos do escoamento superficial, possui uma avançada interface gráfica que ilustra os componentes do sistema hidrológico com recursos interativos e é um sistema capaz de armazenar e gerenciar dados variáveis no tempo, e além disso, exibem e relatam os resultados da modelagem.

Vale ressaltar, que o software HEC-HMS pode ser utilizado tanto para simular uma única bacia quanto um sistema de múltiplas bacias hidrológicamente ligadas (ABUSHANDI; MERKEL, 2013), ou seja, é um modelo software que suporta tanto a modelagem baseada em parâmetros concentrados como a modelagem baseada em

parâmetros semi-distribuídos (AGRAWAL, 2005). Além disso, o software emprega diferentes métodos para modelagem de chuva, perdas hidrológicas, propagação em canais e reservatórios, escoamento de base (KAMALI; MOUSAVI; ABBASPOUR, 2013) e também fornece várias opções para simular processos de chuva-vazão em bacias hidrográficas (SILVA; WEERAKOON; HERATH, 2014).

Conforme Meenu, Rehana e Mujumdar (2013), o HEC-HMS é constituído por quatro componentes fundamentais, sendo estes: a) modelo de bacia; b) modelo meteorológico; c) especificações de controle e d) dados de séries temporais (dados de entrada). O modelo de bacia armazena os conjuntos de dados físicos que descrevem as propriedades das bacias. O modelo meteorológico inclui precipitação, evapotranspiração e os dados de degelo, onde seis métodos diferentes de precipitação, dois métodos de evapotranspiração, e um método de degelo estão incluídos. O intervalo de tempo de uma simulação é controlado por especificações de controle, incluindo data e hora de início e de término, e a etapa do tempo de computação (ABUSHANDI; MERKEL, 2013).

O primeiro passo para a aplicação do HEC-HMS é definir alguns parâmetros básicos de entrada, como a área da bacia e das sub-bacias (ABUSHANDI; MERKEL, 2013). Os cálculos fundamentais são executados no componente "modelo de bacia", em que o usuário, depois de introduzir os parâmetros básicos, define o método de cálculo da perda de precipitação e a transformação eficaz de precipitação para o escoamento. Também é possível introduzir o hidrograma unitário definido pelo usuário. Definir o modelo meteorológico como um elemento de entrada para cada uma das sub-bacias é crucial para a realização desses cálculos (WALEGA, 2013).

Existem diferentes programas de ambiente SIG que podem ser usados para processar e definir os parâmetros básicos de entrada para o software HEC-HMS. De acordo com Paudel, Nelson e Scharffernberg (2009), a principal ferramenta utilizada para criar os parâmetros do modelo ModClark é o HEC-GeoHMS.

O HEC-GeoHMS é uma extensão de ambiente SIG que também foi desenvolvido pela USACE. Esta extensão contempla um conjunto de ferramentas geoespaciais desenvolvidas para realizar estudos hidrológicos. A ferramenta HEC-GeoHMS permite aos usuários visualizar informações espaciais, características das bacias hidrográficas, realizar análises espaciais, delinear sub-bacias e construir entradas para modelos hidrológicos (FLEMING; DOAN, 2013). Esta extensão

converte as informações dos dados espaciais do SIG para o software HEC-HMS, sendo que o HEC-GeoHMS pode criar arquivos de entrada HMS que são compatíveis com as três abordagens de discretização espacial: concentrada, semi-distribuída e distribuída.

Scharffenberg e Fleming (2010) relatam que, o software HEC-HMS é projetado para ser aplicável em uma ampla gama de áreas geográficas, visando resolver o maior número de problemas possíveis. Sendo assim, os hidrogramas produzidos pelo programa podem ser usados diretamente ou em conjunto com outros softwares para estudos de análise de inundações urbanas, frequência de cheias, planejamento do sistema de alerta de cheia, capacidade do vertedouro do reservatório, estudos ambientais, erosão superficial e propagação de sedimentos (SCHARFFENBERG, 2015).

Estudos anteriores sobre HEC-HMS provaram a sua capacidade de simular e prevenir a vazão com base em diferentes conjuntos de dados e tipos de bacias, sendo alguns destes relatados por: Halwatura e Najim, 2013; Joo *et al.*, 2014; Laouacheria e Mansouri, 2015; Dariane, Javadianzadeh e James, 2016; Ibrahim-Bathis e Ahmed, 2016. Diante disto, o software tem sido amplamente aplicado para bacias hidrográficas tropicais e subtropicais, úmidas e áridas, visando a simulação de hidrogramas de descarga, tanto para projetos de engenharia hidrológica, quanto para pesquisas de impactos ambientais (CAMPOS, 2009).

2.8 Software HEC-RAS

O HEC-RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System), também é um software gratuito e desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (HEC) do corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE). O software HEC-RAS possui um conjunto de ferramentas que auxilia no gerenciamento e delimitação da área de inundação de rios, na análise de alterações de perfil de água pertinentes às mudanças de geometria de canal, na análise do transporte de sedimentos e no efeito das estruturas hidráulicas como bueiros e pontes. Este modelo pode ser utilizado em uma rede de canais naturais ou artificiais, sistemas dendríticos ou apenas em um rio (BALES *et al.*, 2007; BRUNNER, 2016).

A versão mais recente do software HEC-RAS é a versão 5.0, a qual engloba a modelagem unidimensional e bidimensional do fluxo, bem como os recursos de

modelagem de transferência de sedimentos. Antes da atualização recente, o programa era apenas unidimensional. As versões atuais do HEC-RAS dispõem de uma interface gráfica para visualização tridimensional da simulação, além de possuírem capacidade de gerar gráficos e tabelas com resultados das simulações, bem como, componentes independentes para análise hidráulica (MULUNGO, 2012).

O software HEC-RAS é um modelo do tipo seção composta, o qual permite que os usuários executem cálculos de simulação levando em consideração tanto o escoamento unidimensional em regime permanente quanto o escoamento unidimensional em regime variado (BRUNNER, 2016). Tendo em vista o escoamento uniforme, o software é capaz de simular os perfis da superfície da água entre seções transversais, empregando cálculos que envolvem a equação da Energia. Diante disto, torna-se necessário o levantamento de seções transversais que tragam detalhamento da rede fluvial, além dos dados de descarga em cada seção determinada (KNEBL *et al.*, 2005; MAIDMENT, 1993; REZAIE *et al.*, 2014).

Vários estudos voltados para a modelagem hidráulica vêm aplicando o software HEC-RAS, tanto para a simulação dos níveis de cheias e do perfil longitudinal da linha d'água do canal, quanto para estudos de mapeamento de manchas de inundações, tais como, Armas, Beilicci e Beilicci (2017), Coelho Filho *et al.* (2015), Ribeiro e Lima (2011) e Vianna (2000).

3 Material e Métodos

3.1 Área de estudo

O presente trabalho foi conduzido na bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC), localizada no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. A bacia em questão possui uma área de drenagem de 121,3 km² e o seu curso d'água principal é o principal afluente da bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP), e está situada entre as cidades de Canguçu, Morro Redondo e Pelotas.

O artigo 171 da Constituição Estadual foi regulamentado pela Lei nº 10.350 de 1994, a qual estabelece, para cada bacia de um determinado estado, a formação de um comitê de bacia que é responsável pelo gerenciamento dos recursos hídricos. Conforme a referida lei, o estado do Rio Grande do Sul foi dividido em três regiões, sendo essas, rio Uruguai, Guaíba e Litoral. Cada uma destas regiões foi subdividida em bacias hidrográficas, totalizando 25 bacias. Diante disto, salienta-se, que a BHAP integra a bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo que está localizada na região do Litoral (FEPAM, 2016).

Na Figura 7 é possível analisar a delimitação da bacia hidrográfica do arroio Cadeia, bem como a localização da bacia do arroio Pelotas à montante da seção de controle Ponte Cordeiro de Farias (BHAP-PCF) de responsabilidade da ANA, com uma área de aproximadamente 370km², abrangendo a área da rede de monitoramento de responsabilidade do Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas da Universidade Federal de Pelotas, a qual será abordada na seção 3.5.

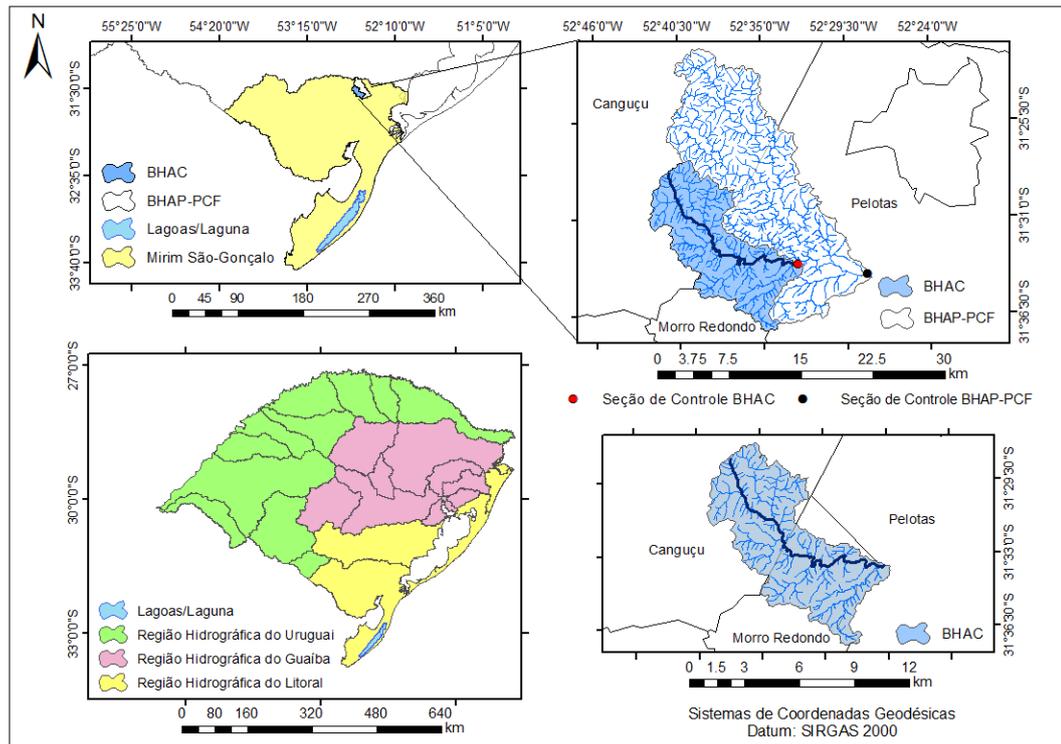


Figura 7 - Localização da BHAC-PCF e da BHAC em sua região hidrográfica.
 Fonte: Elaborado a partir de dados da base cartográfica de Hasenack e Weber (2010) e do IBGE.

Destaca-se que, em março de 2003, o arroio Pelotas foi declarado Patrimônio Cultural do estado do Rio Grande do Sul, pela Lei 11.895, uma vez que é um importante manancial hídrico para Pelotas e região, fornecendo cerca de 36 milhões de litros de água por dia para o abastecimento da população (SANEP, 2015). Além disso, o arroio é um importante afluente do canal São Gonçalo, importante via navegável que liga a laguna dos Patos à lagoa Mirim e abastece o município de Rio Grande.

Considerando que a Estação Agroclimatológica de Pelotas, localizada no município de Capão do Leão, represente a BHAC, os registros históricos da Normal Climatológica do período de 1971 a 2000 relatam que a temperatura média anual na região é de 17,8°C, variando de -3°C a 39,6°C, que a umidade relativa média anual é de 80,7%, variando de 78,6% a 83,3%, que a velocidade média anual do vento é de 3,5m·s⁻¹, variando entre 2,6m·s⁻¹ e 4,0m·s⁻¹, que a evapotranspiração potencial média anual é de 1.103,1mm, variando entre 985,8mm e 1.568,7mm, e que a precipitação média é de 1.366,9mm.

De acordo com o estudo de Sparovek, Van Lier e Dourado Neto (2007), que levou em consideração a classificação climática de Köppen, o clima do Rio Grande do Sul é do tipo Cf, caracterizado por ser temperado úmido e não possuir estação

seca. Kuinchtner e Buriol (2001) adotaram a classificação de Koppen e Thornthwaite para determinar o clima no estado do Rio Grande do Sul, os quais relataram que o clima predominante é do tipo Cfa (subtropical) e Cfb (temperado), sendo que a BHAC se enquadra na classe Cfa, com predominância de clima chuvoso e temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e do mês mais frio superior a 3°C.

3.2 Caracterização do relevo da área de estudo

Conforme um estudo realizado por Moura (2018), a caracterização do relevo da bacia hidrográfica de interesse é de suma importância para a modelagem do hidrograma de ESD, pois possibilita a derivação de diferentes informações e dados fundamentais para tal procedimento. Sendo assim, foram utilizados os planos de informações referentes às curvas de nível, pontos cotados e hidrografia vetorizada (Figura 8), obtidos da base cartográfica de Hasenack e Weber (2010), contemplando todo o estado do Rio Grande do Sul, na escala de 1:50.000, com intuito de elaborar o modelo digital de elevação (MDE).

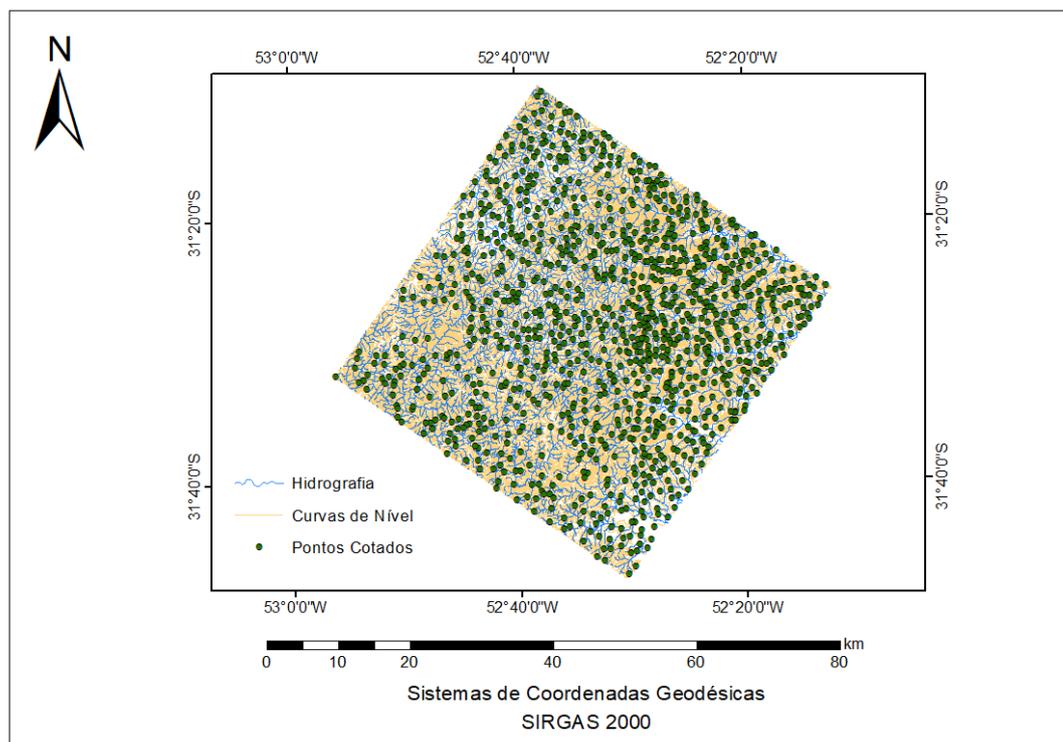


Figura 8 - Planos de informações utilizados para gerar o Modelo Digital de Elevação.
Fonte: Elaborado a partir de dados da base cartográfica de Hasenack e Weber (2010).

Estes dados foram usados como entrada no software ArcGIS Desktop 10.1 (ESRI, 2014) e interpolados por meio do algoritmo “topo to raster”. Devido ao grande esforço computacional demandado no processamento do MDE, principalmente em grandes áreas, como é o caso do Rio Grande do Sul, foi determinado uma máscara sobre a região de estudo, gerando assim o MDE apenas para extensão definida. A resolução espacial do MDE foi de 25m, considerando a relação entre a escala da informação e a área mínima identificável (TOBLER, 1987).

Após a obtenção do MDE, fez-se necessária a aplicação do algoritmo “fill” do ambiente SIG em questão para o preenchimento das depressões espúrias (altitudes equivocadas) obtidas no processo da interpolação (ELESBON *et al.*, 2011), visando a obtenção do modelo digital de elevação hidrológicamente consistente (MDEHC), o qual pode ser observado na Figura 9. De acordo com ESRI (2014), os MDEHC, são representações do relevo que reproduzem, com exatidão, o caminho preferencial do escoamento da água superficial observado no mundo real.

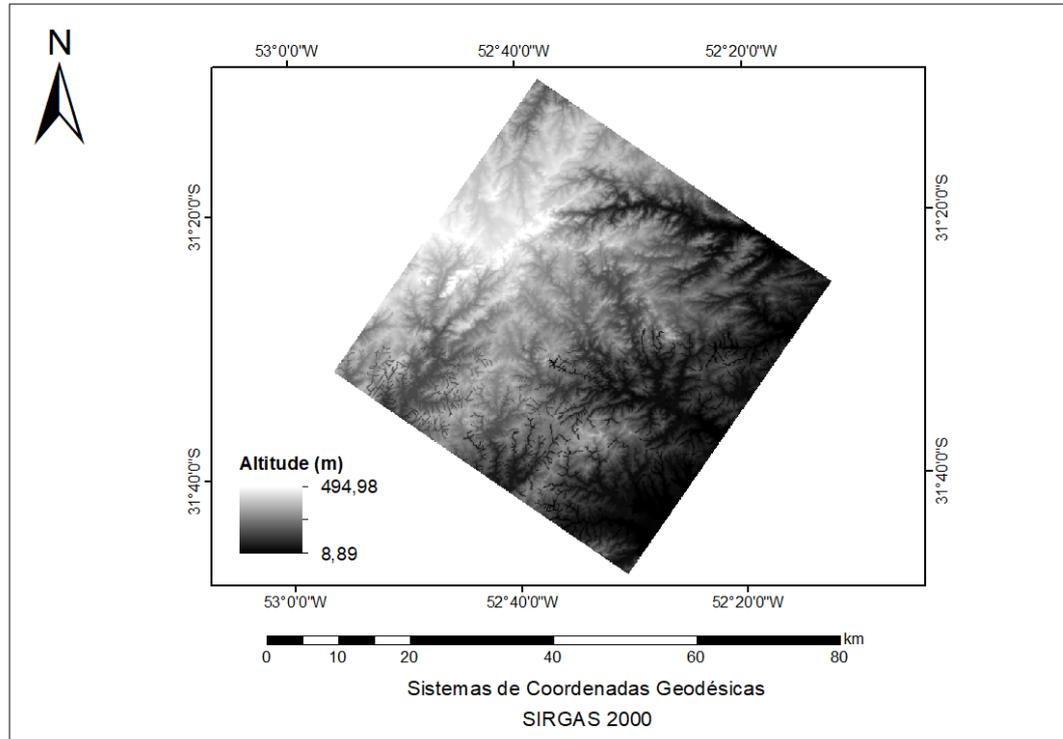


Figura 9 - Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente empregado para processar a base de dados espaciais da BHAC.

3.3 Discretização da BHAC

A delimitação automática das bacias também foi realizada no software ArcGIS e seguiu a metodologia utilizada por Martins *et al.* (2011), subdividida em três principais etapas: a) Flow Direction: determina a direção do fluxo de escoamento em cada pixel do MDE; b) Flow Accumulation: determina o escoamento acumulado; e c) Watershed: delimita a área de drenagem à montante do seção de controle estabelecida.

Levando em consideração a modelagem hidráulica, o presente estudo também considerou a aplicação da modelagem semi-distribuída por sub-bacias, para todos os eventos selecionados, tornando-se necessária a realização da discretização da BHAC, visto que seções transversais foram levantadas ao longo do canal principal da bacia (seção 3.9.1). Vale ressaltar que as sub-bacias foram delimitadas conforme a localização dessas seções transversais levantadas nas campanhas de campo, ou seja, o exutório de cada sub-bacia é condizente com a localização da seção correspondente em análise, conforme pode ser observado na Figura 10. Salienta-se que a seção 1 corresponde à seção de controle da BHAC.

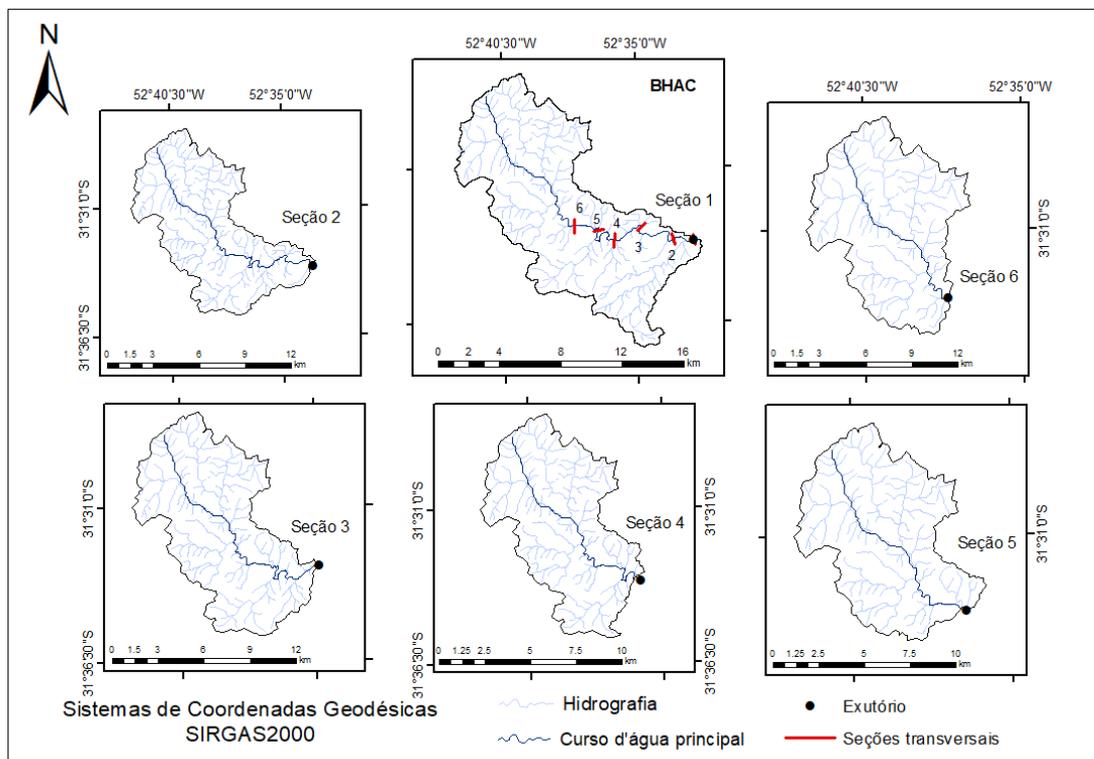


Figura 10 – Discretização espacial da BHAC e das sub-bacias à montante das seções transversais.

Entretanto, para a realização da modelagem hidrológica, foi necessário considerar a sub-bacia à montante da seção transversal, bem como a sub-bacia a jusante da seção transversal, para estar condizente com a área total da BHAC, visto que o hidrograma observado do estudo se encontra no exutório da mesma. Dessa maneira, foram delimitadas 10 sub-bacias no total, sendo que para cada simulação hidrológica foi considerada duas sub-bacias por vez, conforme a Figura 11. A Tabela 1 apresenta a área correspondente de cada uma das sub-bacias.

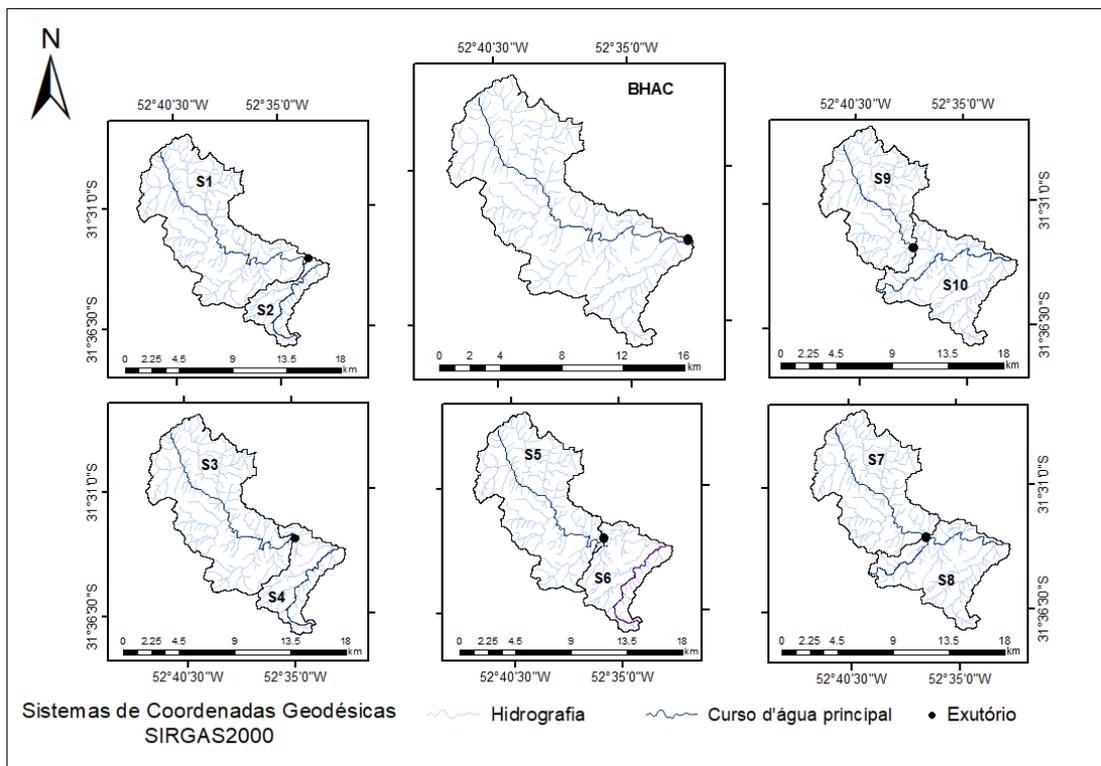


Figura 11 – Discretização espacial da BHAC e das sub-bacias à montante e a jusante das seções transversais.

Tabela 1 – Área das sub-bacias

Sub-bacia	Área (km ²)
S1	100,6
S2	20,6
S3	93,0
S4	28,2
S5	85,4
S6	35,4
S7	71,8
S8	49,4
S9	65,3
S10	55,8

3.4 Caracterização geomorfológica das bacias hidrográficas

Com a finalidade de obtenção dos parâmetros de entrada para a simulação hidrológica, foi necessário realizar a caracterização geomorfológica da bacia como um todo, assim como das sub-bacias delimitadas, onde foram derivadas variáveis simples, como a área de drenagem e comprimento de cursos d'água, e também variáveis mais complexas de serem obtidas manualmente como a declividade média da bacia e de cursos d'água.

Seguindo os conceitos propostos por Christofolletti (1980), a caracterização geomorfológica da BHAC e das sub-bacias foram realizadas em um ambiente SIG, com intuito de automatizar o processo, conforme mencionado na seção 2.6. Sendo assim, foi elaborado o MDEHC para as bacias, com intuito de obter a variação do relevo ao longo da área em estudo, visto que esta possui influência direta no comportamento do ESD. A variação do relevo ao longo da BHAC e das sub-bacias delimitadas neste estudo é ilustrado na Figura 12.

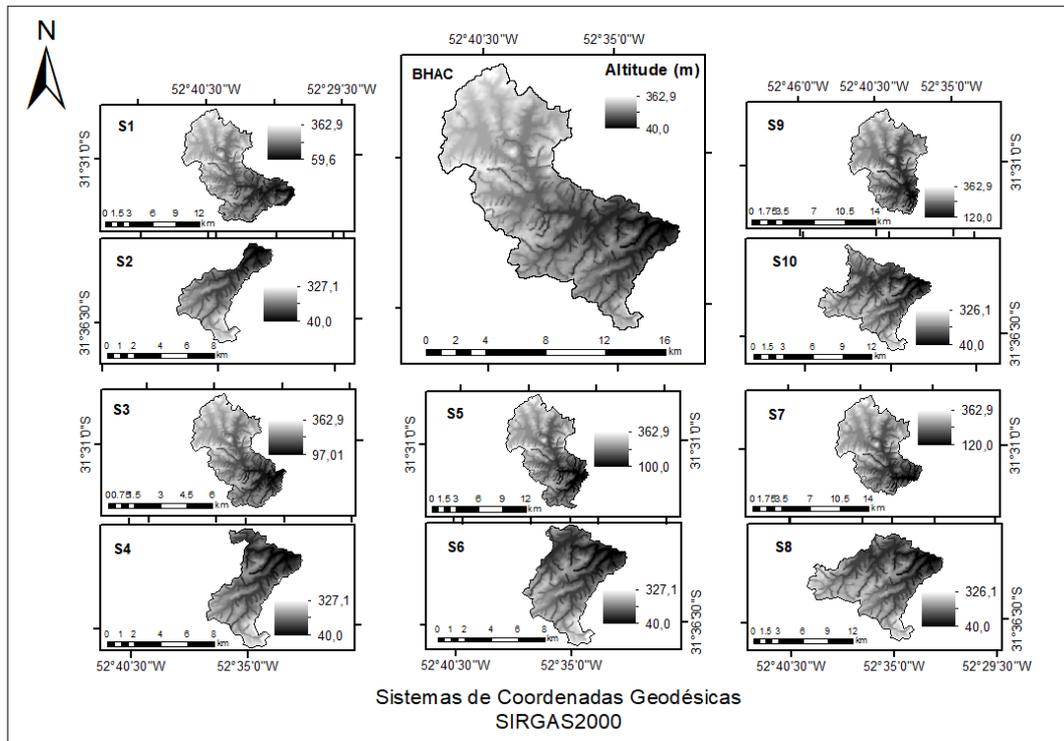


Figura 12 - Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente da BHAC e das sub-bacias.

Analisando a BHAC como um todo, é possível constatar que a cabeceira da bacia apresenta valores elevados de altitude quando comparada à região da seção

de controle, apresentando 322,9m de desnível entre a cota mais alta e o exutório da bacia. Quando analisado por sub-bacias, pode-se perceber que as maiores altitudes se encontram nas sub-bacias delimitadas à montante das seções transversais e as menores altitudes nas sub-bacias a jusante das seções. Em relação ao desnível, a sub-bacia que apresenta a maior diferença é a S1 com 303,3m, seguida da S2, S4 e S6 com 287,1m e da S8 e S10 com 286,1m.

Além da variação do relevo ao longo das bacias, a declividade do terreno também é um fator que influencia o comportamento do ESD. Villela e Mattos (1975), afirmam que a declividade de uma bacia controla em boa parte a velocidade com que ocorre o ESD, afetando, portanto, o tempo que a água da chuva leva para concentrar-se nos leitos fluviais. Os mesmos autores salientam que a magnitude dos picos de enchentes, a maior ou menor oportunidade de infiltração e a susceptibilidade para erosão dos solos, dependem da rapidez com que ocorre o escoamento nas bacias.

Com isso, foi gerado o mapa de declividade do terreno ao longo da BHAC e das sub-bacias (Figura 13), adotando a classificação proposta pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da EMBRAPA (SANTOS et al., 2013), onde as classes são divididas em: a) 0 – 3% (Plano); b) 3 – 8% (Suave-Plano); c) 8 – 20% (Ondulado); d) 20 – 45% (Forte-Ondulado); e) 45 – 75% (Montanhoso); f) > 75 (Forte-Montanhoso). Na Tabela 2 está disposto o percentual da área correspondente para cada classe, tanto para a BHAC quanto para as sub-bacias.

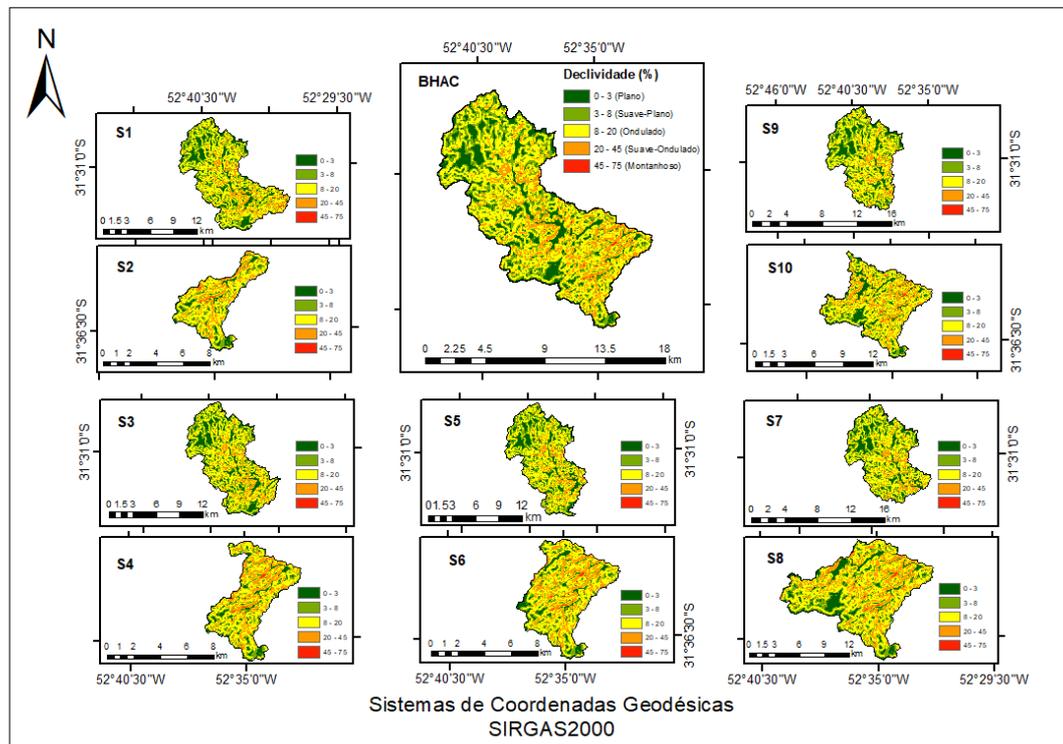


Figura 13 - Distribuição dos valores de declividade do terreno para a BHAC e para as sub-bacias.

Tabela 2 - Valores percentuais da área de cada classe de declividade para a BHAC

Declividade (%)	Área (%)										
	BHAC	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
0 - 3	17,5	18,6	11,2	19,6	10,1	19,5	12,0	19,5	14,2	19,7	14,7
3 - 8	24,2	25,0	20,5	25,7	19,3	26,3	19,2	27,0	20,2	27,6	20,2
8 - 20	42,3	41,8	45,2	41,7	44,5	41,6	44,3	41,9	43,1	41,9	42,9
20 - 45	15,8	14,5	22,7	12,9	25,6	12,5	24,0	11,5	22,1	10,7	21,8
45 - 75	0,2	0,1	0,3	0,1	0,5	0,1	0,4	0,1	0,3	0,1	0,3
> 75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Realizando uma análise da declividade da BHAC como um todo, constata-se predominância de relevo ondulado. Também percebe-se que, embora a região da cabeceira da bacia apresente altitudes mais elevadas que a região da seção de controle, a declividade apresenta maior variação quando se observa a região do baixo arroio Cadeia.

Já em relação a discretização da declividade ao longo das sub-bacias, os resultados obtidos corroboram com a análise obtida pela discretização dos MDEHC's das mesmas, uma vez que as maiores porcentagens de declividade podem ser observados nas sub-bacias S2, S4, S6, S8 e S10, as quais possuem os maiores desníveis. A predominância de relevo ondulado também é constatado para todas as sub-bacias.

Analisando as classes de solos que se encontram ao longo da BHAC (Figura 14), encontra-se 3 tipos (CUNHA; SILVEIRA, 1996; CUNHA *et al.*, 1996; CUNHA *et al.*, 1997), os quais são: Argissolo Vermelho-Amarelo; Argissolo Bruno-Acinzentado; e Neossolo. Na Tabela 3, pode-se constatar que há predominância do solo denominado Argissolo Bruno-Acinzentado.

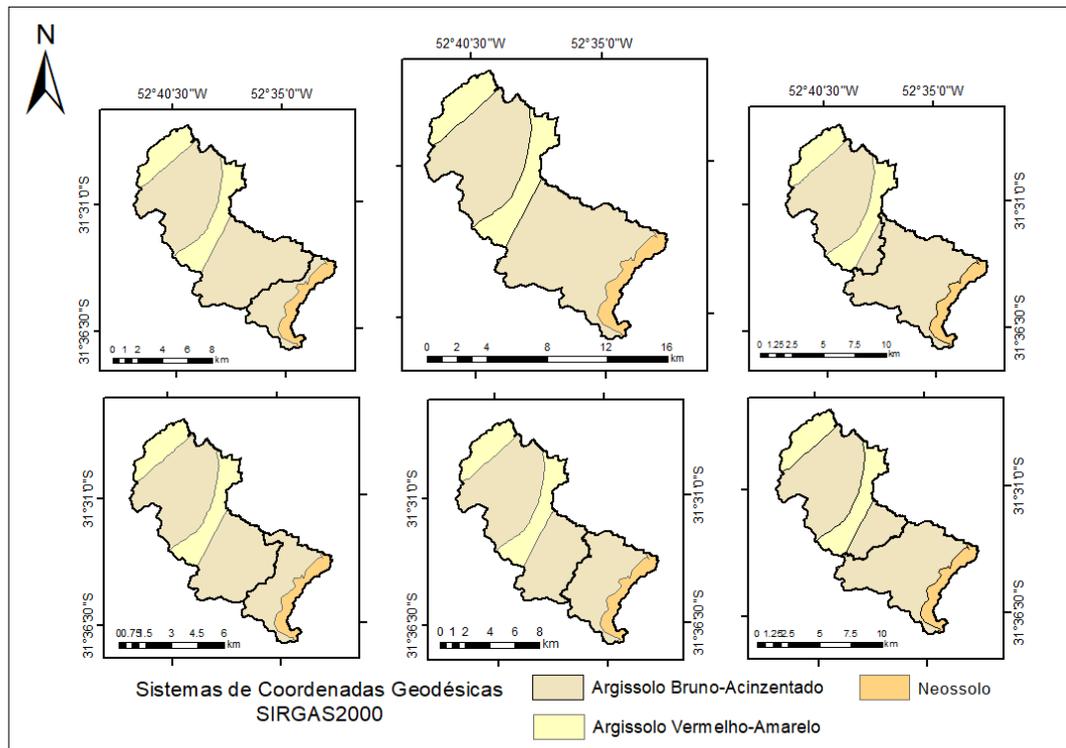


Figura 14- Distribuição das classes de solo para a BHAC e para as sub-bacias.
Fonte: Elaborado a partir de dados de Cunha e Silveira (1996), Cunha, Silveira e Severo (1996) e Cunha *et al.* (1997).

Tabela 3 - Classes de solos para a BHAC e para as sub-bacias

Bacia	% por bacia		
	Argissolo Vermelho-Amarelo	Argissolo Bruno-Acinzentado	Neossolo
BHAC	23,6	89,8	8,0
S1	23,5	77,0	0,0
S2	0,0	12,7	8,0
S3	23,5	69,3	0,0
S4	0,0	20,3	7,9
S5	23,5	61,9	0,0
S6	0,0	27,4	7,9
S7	0,1	41,5	7,9
S8	23,4	48,1	0,0
S9	0,1	47,8	7,9
S10	23,4	41,9	0,0

Segundo Streck *et al.* (2008), os Argissolos são solos geralmente profundos a muito profundos, variando de bem drenados a imperfeitamente drenados, e são originados de diversos materiais, como basaltos, granitos, arenitos, argilitos e siltitos. Além disso, apresentam um perfil com uma sequência de horizontes A-Bt-C ou A-E-Bt-C, onde o horizonte B é do tipo B textural e significativamente mais argiloso do que os horizontes A e E.

No Rio Grande do Sul, os Argissolos foram identificados no segundo nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), de acordo com a cor que predomina no horizonte B textural: Argissolos Vermelho-Amarelos, Bruno-Acinzentados, Acinzentados e Amarelos. As cores vermelha e vermelho-amarela indicam ambientes de boa drenagem, já as cores bruno-acinzentadas e acinzentadas indicam solos com drenagem moderada ou imperfeita que os mantém saturados com água em determinados períodos do ano (STRECK *et al.*, 2008).

Visando o mapeamento do uso e cobertura do solo, foram empregadas imagens do satélite RapidEye com resolução espacial de 5m, classificadas de forma supervisionada através do método da Máxima Verossimilhança (RICHARDS; JIA, 2006). As classes identificadas foram: mata, área não cultivada, solo exposto, área cultivada e água. Observando a Figura 15 e a Tabela 4, o uso do solo predominante na bacia do arroio Cadeia como um todo é a mata, sendo este responsável pela ocupação de 34,1% da área. A segunda cobertura de solo mais significativa é a área não cultivada (32,7%), seguida por solo exposto (20,8%), área cultivada (12,3%), e água (0,1%). Em relação às sub-bacias, a predominância do uso do solo segue a mesma tendência observada na bacia do arroio Cadeia, com exceção da S2 e S6, onde a área não cultivada se sobressai da área de mata.

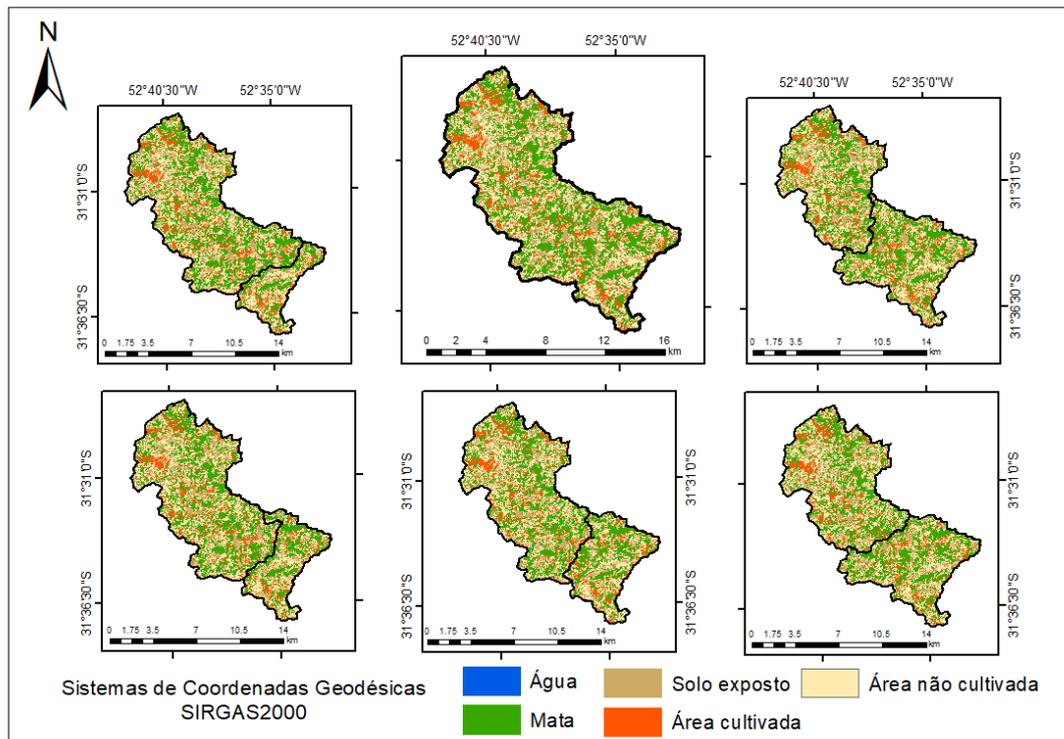


Figura 15 - Distribuição das classes de uso e ocupação do solo para a BHAC e para as sub-bacias.

Tabela 4 - Classes de uso do solo para a BHAC e para as sub-bacias
% por bacia

Bacia	Água	Mata	Solo exposto	Área cultivada	Área não cultivada
BHAC	0,1	34,1	20,8	12,3	32,7
S1	0,1	34,7	21,1	12,2	32,0
S2	0,0	31,5	19,0	13,1	36,4
S3	0,0	33,9	21,4	12,2	32,4
S4	0,1	35,1	18,3	12,6	33,9
S5	0,0	33,4	21,7	12,2	32,7
S6	0,1	36,4	18,1	12,4	33,1
S7	0,0	32,4	21,4	12,7	33,4
S8	0,1	36,7	19,7	11,7	31,8
S9	0,0	31,6	21,9	13,0	33,5
S10	0,1	37,1	19,4	11,5	31,9

3.5 Monitoramento Hidrológico

Para a realização da modelagem de cheias na BHAC, foram utilizados dados da rede de monitoramento automático (Figura 16) do Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas, da Universidade Federal de Pelotas.

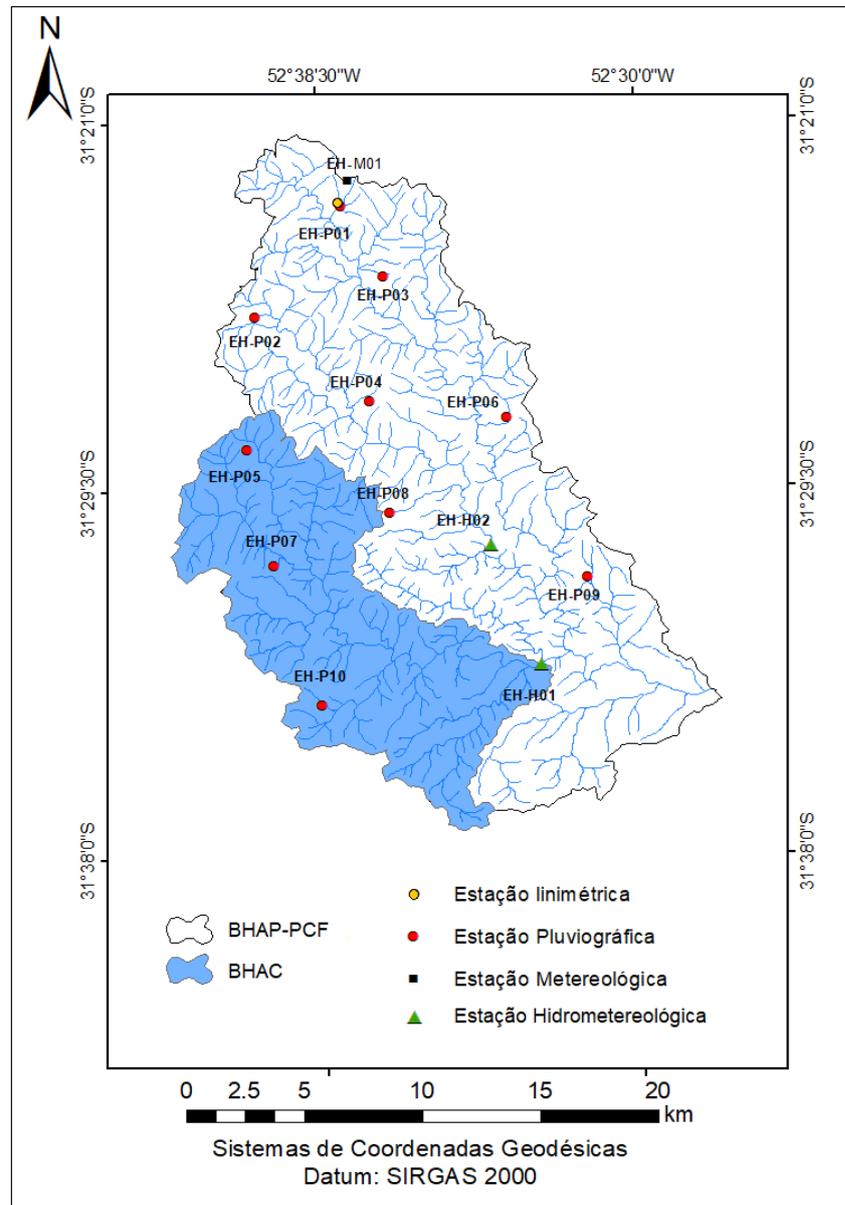


Figura 16 – Estação pluviográfica e limimétrica utilizada para modelagem de cheias na BHAC.

A rede de monitoramento é composta por: a) uma estação meteorológica (EH-M01), sendo que foram utilizados somente seus dados de chuva; b) uma estação de monitoramento fluviométrico e pluviográfico (EH-H01), localizada junto à seção de controle da BHAC, fornecendo informações de chuva e de nível d'água; c) uma estação fluviométrica e pluviográfica (EH-H02), disponibilizando informações de chuva; e d) dez estações pluviográficas (EH-P01, EH-P02, EH-P03, EH-P04, EH-P05, EH-P06, EH-P07, EH-P08, EH-P09, EH-P10), distribuídas ao longo da BHAP-PCF, fornecendo dados de chuva. Todas estas informações são disponibilizadas

com ótima discretização temporal, sendo de 5 minutos ou de 10 minutos, dependendo da estação.

Todas as estações de monitoramento dispõem de pluviômetro automático que utiliza o princípio de cubas basculantes, já a estação de monitoramento de nível d'água utiliza um sensor de pressão. Estas estações possuem sistemas dataloggers para armazenamento de informações, permitindo registrar automaticamente até 3.200 milímetros de precipitação, sendo que a aquisição desses dados são obtidos por meio de computadores portáteis. As Figuras 17-19 ilustram as estações de monitoramento utilizadas no trabalho.



Figura 17 - Ilustração da unidade de aquisição e armazenamento de informações hidrológicas de chuva da estação EH-H03 modelo HOBO Pluviômetro Digital - U30-GSM, marca Onset



Figura 18 - Ilustração da seção de controle do arroio Cadeia com a estrutura para monitoramento automático de nível d'água e também por réguas linimétricas (a); e da unidade de aquisição e armazenamento de informações hidrológicas de chuva e de nível da estação modelo Solar SL2000PNVn, instalada na mesma seção (b)



Figura 19 - Ilustração da estação pluviográfica EH-P08 modelo HOBO Pluviômetro Digital – RG3-M, marca Onset, tendo mais 9 estações deste modelo

Em razão da variabilidade espacial das precipitações há a necessidade de se estimar a precipitação média sobre a bacia hidrográfica em estudo. Em relação ao modelo concentrado, toda a BHAC é representada por uma precipitação média,

oriunda da rede de monitoramento, gerando assim um hietograma médio por evento para a bacia como um todo. Já no modelo semi-distribuído por sub-bacias, a precipitação média é relacionada com a área de influência referente à cada sub-bacia e com a área de influência de cada estação de monitoramento.

Dessa maneira, foram traçados os Polígonos de Thiessen (THIESSEN; ALTER, 1911) sobre a BHAP-PCF (Figura 20), abrangendo toda a extensão da rede de monitoramento, que por sua vez, abrange toda a área da BHAC e das sub-bacias delimitadas. Seguindo este procedimento, 7 das 13 estações de monitoramento (EHP-04, EHP-05, EH-P07, EH-P08, EH-P10, EH-H01, EH-H02) foram consideradas para a determinação do hietograma médio sobre a área da bacia para cada evento em estudo. Na Tabela 5 estão apresentadas as estações indicadas pelos Polígonos de Thiessen, com seus respectivos pesos utilizados para a ponderação da precipitação média.

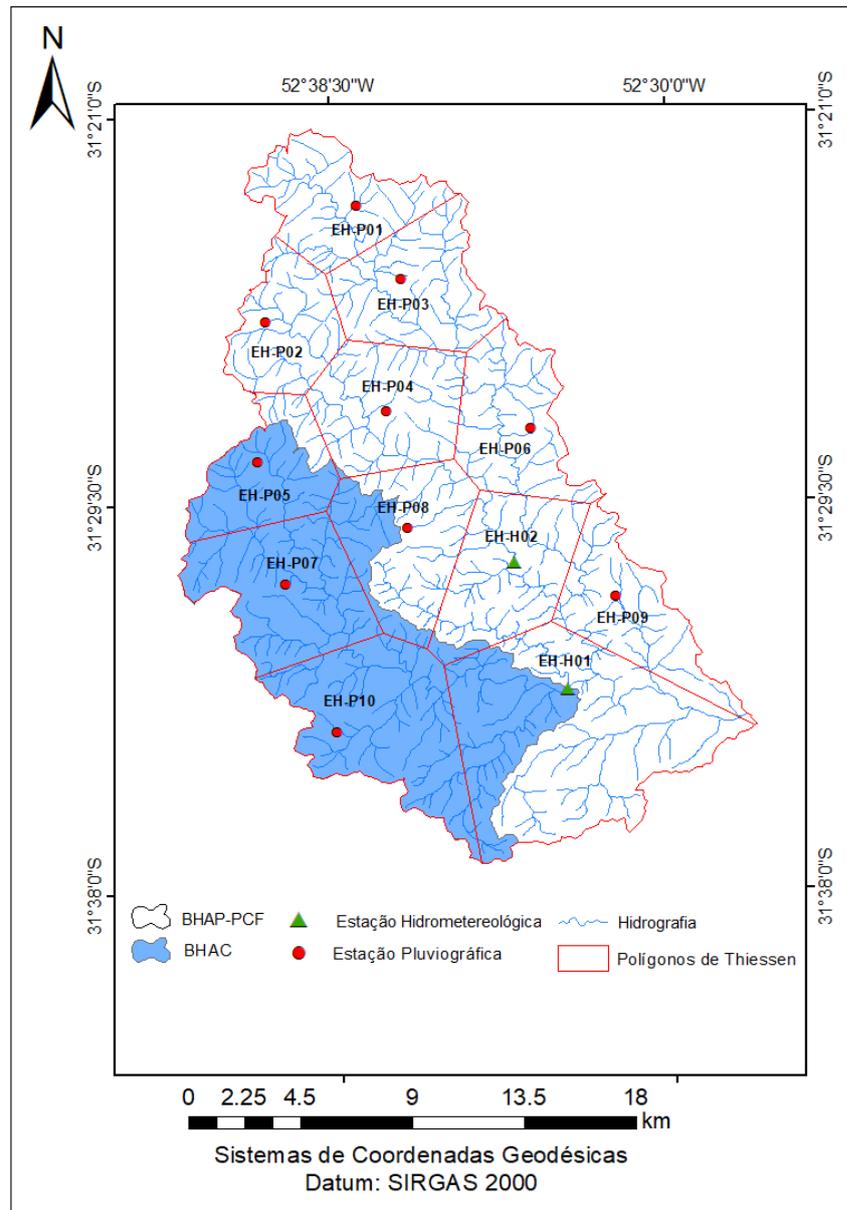


Figura 20 - Área de influência de cada estação de monitoramento com informações de chuva sobre a BHAC, considerando a metodologia dos Polígonos de Thiessen.

Tabela 5 - Estações de monitoramento indicadas pelos Polígonos de Thiessen e suas respectivas áreas de influência

Estações	Área de Influência (%)
EHP-04	0,2
EHP-05	14,5
EH-P07	26,4
EH-P08	7,7
EH-P10	32,1
EH-H01	17,9
EH-H02	1,2

Para a determinação das vazões e obtenção do comportamento do ESD na bacia em estudo, fez-se necessário a utilização da curva-chave da seção de controle da BHAC. A referida curva-chave foi ajustada usando dados de medições de descarga líquida (vazão) e os respectivos níveis dos cursos d'água. No total, foram 43 campanhas hidrológicas (Figura 21) realizadas para tal procedimento incluindo as condições de cheias, utilizando-se molinetes hidrométricos e seguindo procedimentos recomendados por Santos *et al.* (2001).



Figura 21- Campanha hidrológica para determinação de descarga líquida (a) usando micromolinete hidrométrico (b).

Dessa maneira, foi ajustada uma correlação entre os dados de nível d'água monitorados pelo sensor e as medições de descarga líquida, originando a curva-chave, sendo que a essa apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,95. A Equação 2, bem como a Figura 22, apresentam a curva-chave ajustada para a seção de controle da BHAC.

$$Q = 0,0005 \cdot H^{1,983} \quad (2)$$

Onde Q é a vazão em $m^3 \cdot s^{-1}$; e H é o nível d'água em cm monitorado pelo sensor.

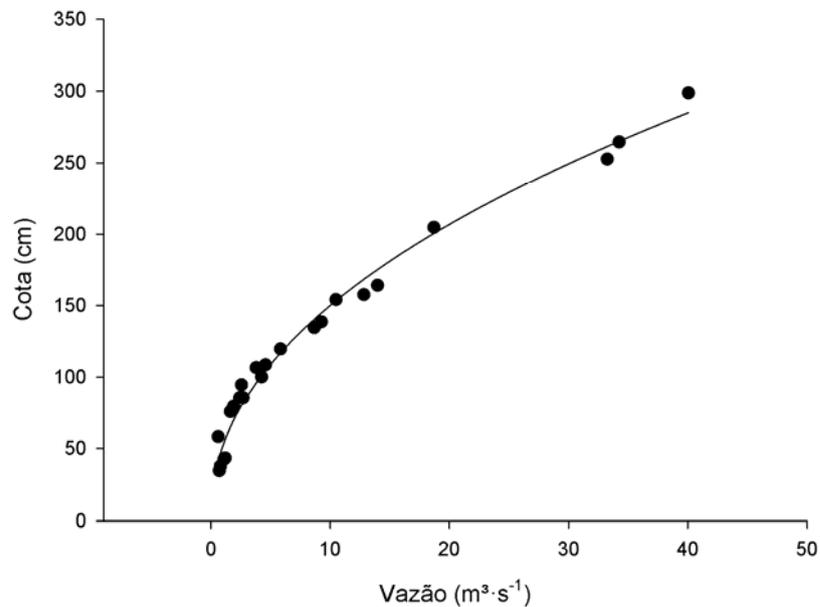


Figura 22 - Curva-chave para a seção de controle da BHAC.

3.5 Separação dos eventos

3.5.1 Hietogramas e Hidrogramas observados

Foram selecionados 8 eventos chuva-vazão com diferentes durações, totais precipitados e intensidades médias, com intuito de realizar a modelagem hidrológica de cheias, empregando a teoria do HUI, dando preferência aos eventos de chuva causadores de cheias mais pronunciadas, conforme recomendado por Raghunath (2006). Os eventos foram organizados visando gerar hietogramas com intervalo de tempo de 30 minutos, sendo a escolha desse intervalo essencial para estudos envolvendo a teoria do HUI. O hietograma médio da bacia, referente a cada evento de chuva, foi computado utilizando as estações consideradas pela metodologia dos Polígonos de Thiessen, conforme citado anteriormente.

Vale salientar que a resposta de cada evento analisado ocorreu em termos da variação da vazão ao longo do tempo, dos dados de vazão obtidos a partir da combinação da curva-chave e do monitoramento linimétrico. Essa combinação de dados propiciou a obtenção do hidrograma referente a cada evento de chuva, também com o intervalo de tempo de 30 minutos.

3.5.2 Hidrogramas de escoamento superficial direto (ESD)

A resposta de uma bacia hidrográfica expressa em forma de hidrograma recebe contribuições de diferentes componentes de escoamento, os quais são variáveis e dependentes das condições meteorológicas, geomorfológicas e hidrológicas da bacia hidrográfica. Ressalta-se que, para a determinação do hidrograma observado, é necessário apenas conhecer a parcela do escoamento superficial direto, isto é, conhecer a sequência temporal de vazões decorrentes do ESD ocasionada por um evento de chuva.

Para a separação do ESD do hidrograma de escoamento total de cada evento selecionado, utilizou-se o Método das Inflexões, conforme descrito por Mello e Silva (2013), que une, através de uma reta, o ponto sobre o hidrograma após o qual a contribuição do ESD se inicia ao ponto a partir do qual se encerra este escoamento, conhecidos como inflexões A e C. A título de ilustração, a Figura 23 permite uma melhor compreensão da metodologia empregada em um dos eventos chuva-vazão analisados.

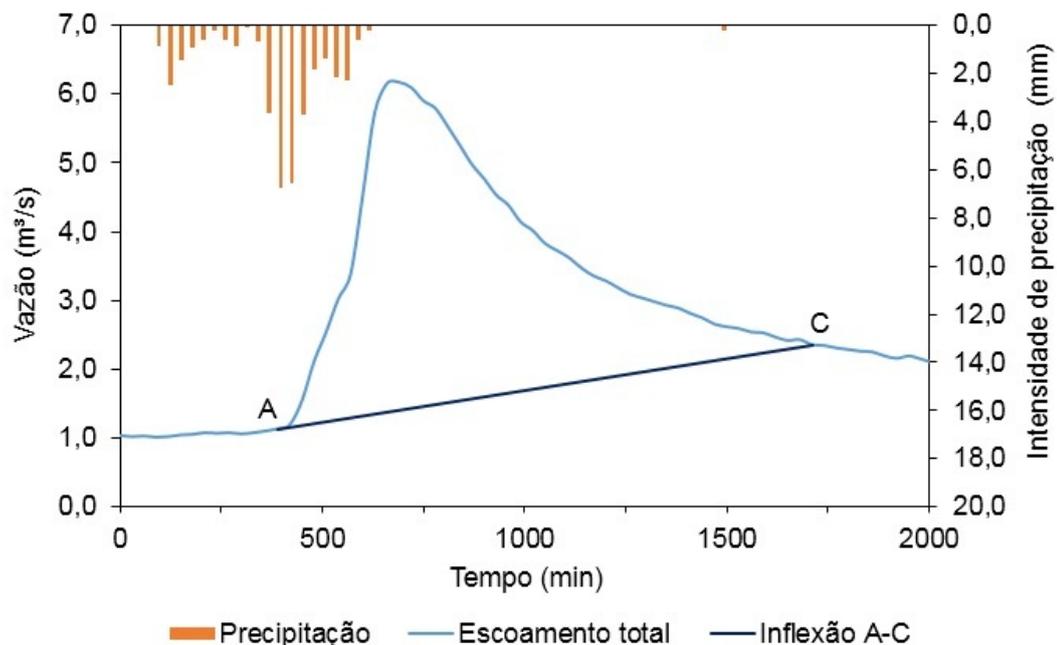


Figura 23 - Representação do Método das Inflexões utilizado na separação do ESD do escoamento total.

Conforme Mello e Silva (2013), esta metodologia consiste na determinação do ponto A, visualmente, diante aos valores de vazão, e o ponto C, analiticamente, determinando-se a constante de depleção (K) baseada nos últimos valores de

vazão, os quais pertencem apenas ao escoamento de base. Esse procedimento é empregado até que se encontre um valor para K sensivelmente inferior aos obtidos inicialmente, o que significa que uma vazão mais alta foi atingida, ou seja, indicando a contribuição do ESD no valor total da vazão. Esta metodologia tem sido amplamente empregada em estudos dessa natureza, tais como Agirre *et al.* (2005), Jena e Tiwari (2006), Choi, Lee e Kim (2011) e Che, Nangare e Mays (2014).

3.5.3 Hietogramas de precipitação efetiva (P_e)

O volume do ESD, referente a cada evento em estudo, foi obtido aplicando a Regra dos Trapézios, uma integração numérica que determina a área abaixo do hidrograma, seguindo recomendações propostas por Burden e Faires (2013). Já a P_e total de cada evento foi obtida pela razão entre o volume do ESD e a área da bacia hidrográfica.

Posteriormente, foi aplicado o método do Soil Conservation Service – Curve Number (SCS-SN), atualmente conhecido como o método Natural Resources Conservation Service – Curve Number (NRCS-CN), para calcular a distribuição temporal da P_e (hietograma de P_e) para cada evento em análise (YU, 2012). Este método é muito conhecido e utilizado para a estimativa de P_e , tanto em eventos isolados de precipitação, quanto em modelos de simulação hidrossedimentológica (BESKOW, 2009). Mello e Silva (2013) destacam que este método tem sido bastante empregado para estimativa das P_e 's com vistas à estimativa da vazão de projeto e também do hidrograma de projeto.

Apesar de existirem outros métodos para estimativa do hietograma de P_e , o método CN tem sido amplamente empregado para este propósito (ŠRAJ *et al.*, 2010) por se tratar de uma metodologia flexível, simples e de fácil obtenção de dados de entrada (NAGARAJAN; POONGOTHAI, 2012; AJMAL *et al.*, 2015), além de capacidade de resposta às propriedades das bacias hidrográficas, tais como classes de solos, uso da terra, a condição de superfície e a condição antecedente (PONCE; HAWKINS, 1996; YU, 2012).

A seguir é possível observar o princípio físico desta metodologia expressa pela Equação 3 (MELLO; SILVA, 2013):

$$\frac{\text{Volume infiltrado}}{\text{Capacidade máxima de infiltração}} = \frac{\text{Precipitação efetiva}}{\text{Precipitação total}} \quad (3)$$

Podendo ser reescrita como:

$$\frac{P - P_e}{S} = \frac{P_e}{P} \quad (4)$$

Onde P a precipitação total em mm; P_e o deflúvio ou precipitação efetiva em mm; e S o potencial de armazenamento de água no solo em mm.

Esta metodologia também considera as abstrações iniciais (I_a), em mm, que correspondem às perdas de água que ocorrem antes do início da geração do hietograma de ESD, e estão associadas à interceptação, ao armazenamento na superfície do terreno e a infiltração de água no solo (LÓPEZ *et al.*, 2012; JIAO *et al.*, 2015). Introduzindo as I_a na Equação 4, tem-se:

$$\frac{P - P_e - I_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (5)$$

Da equação acima é possível chegar à equação geral do método:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (6)$$

Conforme SCS (1971), o método CN, em seu formato padrão, considera I_a como correspondente a 20% de S. Entretanto, no presente estudo, foram considerados os valores de I_a para cada evento de precipitação pela análise dos hietogramas e de seus respectivos hidrogramas de ESD, seguindo as recomendações de Chow; Maidment; Mays, (1988). A Figura 24 ilustra a I_a .

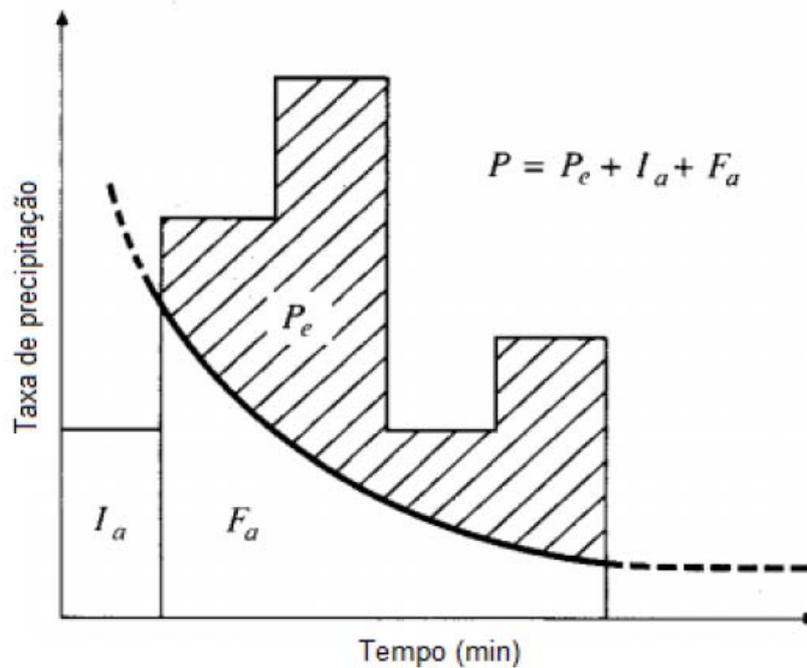


Figura 24 - Ilustração das abstrações iniciais (I_a) seguido da precipitação efetiva (P_e), continuação das abstrações (F_a) e precipitação total (P).

Fonte: Adaptada de Chow, Maidment e Mays (1988).

Devido à existência de dados observados de precipitação (hietograma) e de vazão (hidrograma), optou-se por determinar I_a para cada evento selecionado. Salienta-se que este método indica que somente existirá escoamento quando P for superior a I_a , sendo assim, o potencial de armazenamento de água no solo (S), em mm, é obtido com base no Número da Curva (CN), de acordo com a equação abaixo:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (7)$$

Os valores de CN variam de 1 a 100, sendo que esses são tabelados para diferentes tipos de solos e cobertura vegetal. Dessa forma, quanto maior o valor de CN, mais impermeável é o solo e, conseqüentemente, maior é o ESD, em contra partida, quanto menor o valor de CN, mais permeável é o solo, gerando menos ESD.

Esta metodologia também leva em consideração a influência da umidade do solo antecedente (AMC – Antecedent Moisture Content) ao evento de chuva na definição dos valores de CN. Dessa maneira, os valores de CN são subdivididos em três classes, com base na precipitação acumulada nos cinco dias antecedentes (P_5),

sendo estas: a) AMC I: 0 a 35 mm; b) AMC II: 35 a 52,5 mm; e c) AMC III: superior a 52,5 mm. Os valores de CN referentes a diferentes situações de uso do solo, grupos hidrológicos e classes de umidade antecedente podem ser consultados em Mishra e Singh (2013).

Entretanto, estes valores tabelados de CN foram computados, por meio de avaliações experimentais, levando em consideração características fisiográficas específicas dos Estados Unidos. Sendo assim, estes valores podem sofrer variações quando aplicados em outras regiões com características distintas.

Partindo deste pressuposto, para o referido estudo, os valores de CN foram calibrados para cada evento de precipitação, de modo que a soma de todas as $P_{e's}$ fosse quantitativamente igual ao ESD observado, considerando o valor observado de I_a para cada evento, seguindo as recomendações de Aguirre *et al.* (2005).

3.6 Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica pautada na teoria do HUI de Clark foi realizada com o software HEC-HMS, aplicando sua versão modificada (ModClark), a partir de eventos chuva-vazão observados e das características geomorfológicas da BHAC. A modelagem foi aplicada em dois cenários distintos, sendo estes: a) Cenário 1: Modelagem concentrada; b) Cenário 2: Modelagem semi-distribuída por sub-bacias.

3.6.1 Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark (HUIC)

Conforme mencionado na seção 2.5, o HUI de Clark baseia-se em duas etapas. A primeira consiste na estimativa da resposta de uma bacia hidrográfica às chuvas baseado no Histograma Tempo-Área (HTA) (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013) considerando o tempo de deslocamento da água ao longo da bacia (SÁNCHEZ, 2011). Já a segunda etapa do Método de Clark baseia-se na propagação do HTA através de um reservatório linear que representa o armazenamento de ESD da bacia. Sendo assim, vale destacar, que a aplicação deste método, segundo Ahmad, Ghumman e Ahmad (2009), demanda da estimativa do tempo de concentração (t_c) da bacia hidrográfica e do coeficiente de armazenamento (R).

A formulação matemática do modelo de HUI de Clark é dada pelas seguintes equações:

$$Q_{i+1} = 2 \cdot C_0 \cdot R_{E(i)} + C_1 \cdot Q_1 \quad (8)$$

$$C_0 = \frac{0,5 \cdot t}{R + 0,5 \cdot t} \quad (9)$$

$$C_1 = \frac{R - 0,5 \cdot t}{R + 0,5 \cdot t} \quad (10)$$

Onde Q é a ordenada do HUI; i refere-se ao tempo; R_E é a precipitação efetiva uniformemente distribuída e dependente do Histograma Tempo-Área (HTA) e de uma constante de conversão de unidades; t é o intervalo de simulação em horas; e C_0 e C_1 são coeficientes de ponderação. O modelo de Clark é ilustrado conceitualmente na Figura 25.

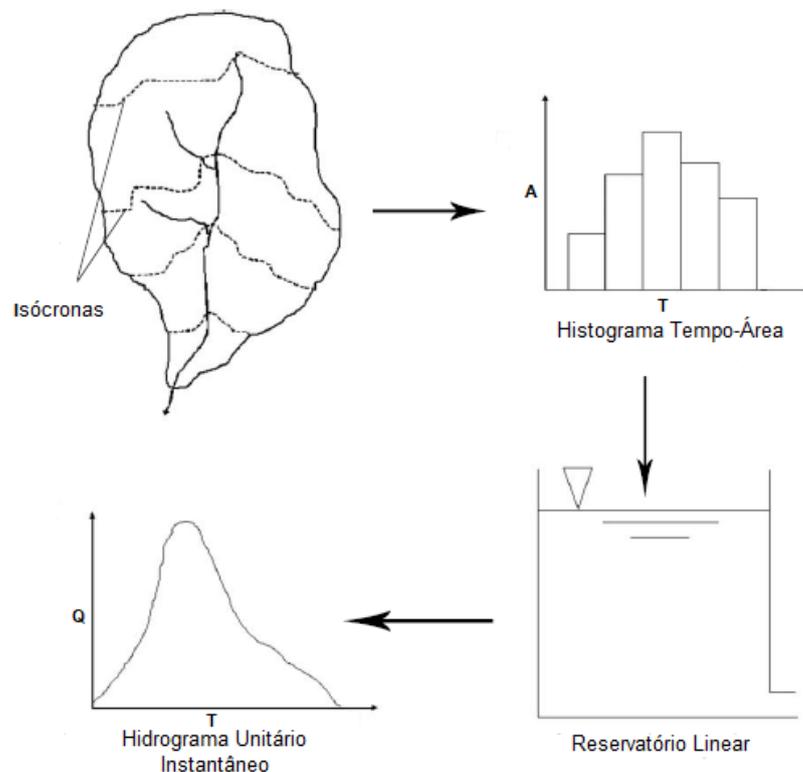


Figura 25- Representação do modelo de Clark.
Fonte: Adaptado de Kull e Feldman (1998).

3.6.2 Hidrograma Unitário Instantâneo Modificado de Clark (ModClark)

O modelo modificado de Clark (ModClark) é uma adaptação da técnica do HUIC para acomodar dados de precipitação espacialmente distribuídos por uma grade uniforme sobreposta na bacia hidrográfica (KUUL; FELDMAN, 1998; PAUDEL; NELSON; SCHARFFENBERG, 2009). A precipitação líquida de cada célula da grade é destinada para o exutório da bacia hidrográfica e encaminhada para um reservatório linear, utilizando o método descrito por Ahmad, Ghumman e Ahmad (2009) e por meio das equações citadas na seção 3.6.1. A Figura 26 demonstra a estrutura do modelo ModClark.

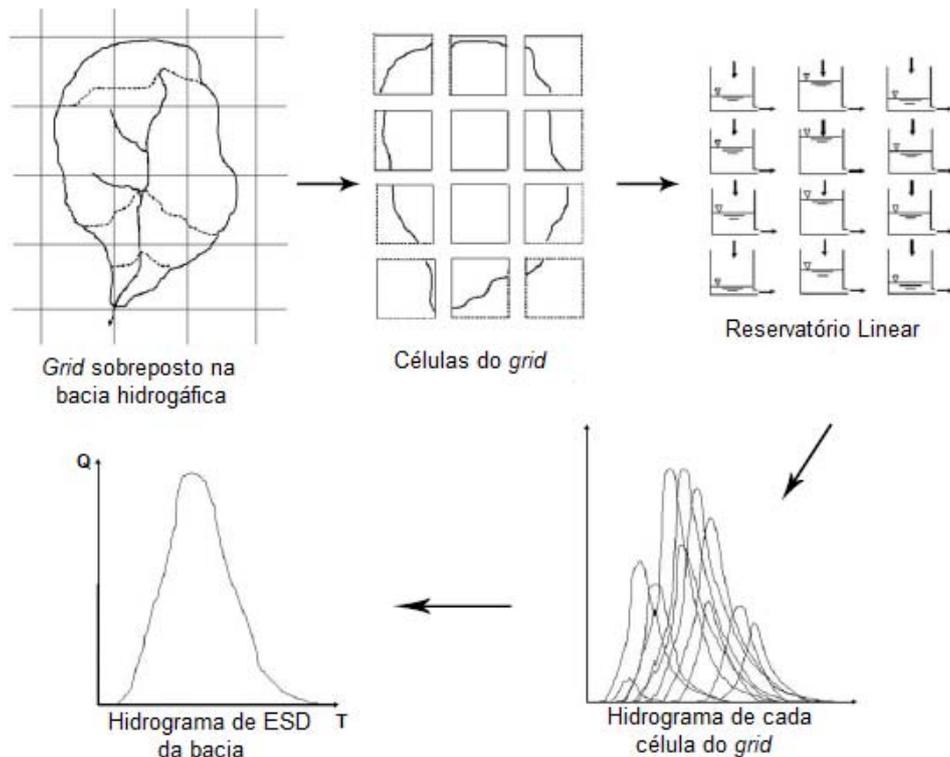


Figura 26- Representação do modelo ModClark
Fonte: Adaptado de Kull e Feldman (1998).

3.6.3 Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark (HUIC_{GEO})

Assim como o HUI de Clark e o ModClark, o modelo HUIC_{GEO} é estabelecido por dois parâmetros (t_c e R), além da obtenção do HTA da bacia. Conforme Straub, Melching e Kocher (2000) e Osman e Abustan (2012), estes parâmetros estão

relacionados com as características da bacia hidrográfica, sendo as mais influenciadoras a topografia da bacia, área de drenagem, comprimento e inclinação do curso d'água principal.

Dessa maneira, quatro propostas para obtenção de t_c e R foram testados neste estudo, com o intuito de obter, dentre essas propostas, uma melhor resposta na modelagem do hidrograma para a BHAC. Vale ressaltar que para a modelagem do HUICGEO, t_c e R foram considerados invariáveis em relação ao evento analisado, tanto no modelo concentrado quanto no semi-distribuído, referindo-se a um único valor para a BHAC, bem como um único valor para cada sub-bacia.

As quatro propostas aplicadas para a obtenção de t_c e R no presente estudo, ambos dados em horas, foram geradas por meio de técnicas de regressão, visando desenvolver relações matemáticas entre as características da bacia hidrográfica para estimar as equações de regionalização dos parâmetros. As unidades das propostas geomorfológicas foram convertidas para o Sistema Internacional (S.I) a fim de facilitar os cálculos e o entendimento dos resultados e discussões de tais propostas ao longo do presente trabalho.

A primeira proposta (P1) aplicada foi a de Straub, Melching e Kocher (2000). No total, os autores estudaram 39 pequenas bacias rurais (0,056-5,957km²) localizadas no estado de Illinois nos Estados Unidos e 121 eventos extremos. Eles detectaram que as características de maior relevância para a estimativa dos parâmetros foram o comprimento e a declividade do curso d'água principal. As equações estimadas podem ser observadas a seguir:

$$t_c = \frac{0,7514 \cdot L^{0,875}}{S_0^{0,181}} \quad (11)$$

$$R = \frac{3,7435 \cdot L^{0,342}}{S_0^{0,790}} \quad (12)$$

Onde, L é comprimento do curso d'água principal em km; e S_0 é a declividade do curso d'água principal em $m \cdot km^{-1}$.

As equações acima foram avaliadas pelos autores comparando o ajuste dos hidrogramas modelados com os hidrogramas observados de 18 bacias hidrográficas,

utilizando dados de 29 eventos extremos, além de comparar os valores obtidos de t_c e R com valores de outros estudos, como o de Graf, Garklavs e Oberg (1982). Ressalta-se que as equações estimadas tiveram R^2 de 0,73 e 0,64 para t_c e R, respectivamente.

A segunda proposta (P2) utilizada no estudo foi a de Osman e Abustan (2012). Foram estudadas 10 bacias rurais (130-1500km²), localizadas na parte central da costa oeste da península da Malásia e 106 eventos extremos. Foi detectado no estudo que a área de drenagem, o comprimento e a declividade do curso d'água principal, foram as características de maior relevância para a estimação de t_c e R. As formulações destes parâmetros estão apresentadas nas Equações 13 e 14.

$$t_c = 0,4444 \cdot A^{0,4867} \cdot \left(\frac{L}{S_0} \right)^{0,4868} \quad (13)$$

$$R = \frac{1,2930 \cdot A^{0,5434}}{S_0^{0,3639}} \quad (14)$$

Onde, A é área de drenagem da bacia em km²; L é comprimento do curso d'água principal em km; e S_0 a declividade do curso d'água principal em m·km⁻¹.

Os autores também avaliaram estas equações comparando o ajuste dos hidrogramas modelados com os hidrogramas observados. Esta avaliação foi realizada utilizando 5 bacias hidrográficas e 20 eventos extremos, em que os R^2 de t_c e R foram 0,88 e 0,85, respectivamente. Vale ressaltar que esta validação foi realizada com bacias de área entre 130 a 631km², portanto, os autores recomendam a utilização destas equações para bacias com área de drenagem inferiores a 631km².

A terceira proposta (P3) empregada foi a de Dooge (1973). A equação de t_c de Dooge é muito conhecida e amplamente utilizada. Para desenvolver as equações, Dooge utilizou dados de um estudo de O'Kelly (1955) de 10 bacias Irlandesas com área de drenagem entre 145 a 948km² (DOOGE, 1973) e obteve as seguintes relações:

$$t_c = \frac{1,7465 \cdot A^{0,41}}{S^{0,17}} \quad (15)$$

$$R = \frac{80,7441 \cdot A^{0,23}}{S^{0,70}} \quad (16)$$

Onde, A é área de drenagem da bacia em km²; e S a declividade média da bacia em partes por 10.000.

A quarta proposta (P4) utilizada no referido estudo foi a de Mohave County (2009). As equações obtidas foram oriundas de estudos em 9 pequenas bacias (3,766-35,102km²), sendo que o principal critério de análise para obtenção da equação do parâmetro t_c foi o estudo do uso do solo. Dessa maneira, foram computadas 3 equações para t_c , sendo que elas devem ser usadas conforme a classificação da bacia hidrográfica: a) deserto/montanhosa; b) rural; e c) urbana. A BHAC se enquadra na classificação rural, portanto a equação de t_c foi:

$$t_c = \frac{3,6996 \cdot A^{0,1} \cdot L^{0,25} \cdot L_{ca}^{0,25}}{S_0^{0,2}} \quad (17)$$

A equação do parâmetro R (Equação 18) está relacionada com o parâmetro t_c , sendo assim, a escolha de qual equação de t_c usar, conseqüentemente, afetará no valor do parâmetro R.

$$R = \frac{0,4349 \cdot t_c^{1,1} \cdot L^{0,8}}{A^{0,57}} \quad (18)$$

Onde, A é área de drenagem da bacia em km²; L o comprimento do curso d'água principal em km; L_{ca} o comprimento medido do ponto de concentração ao longo de L até um ponto em L perpendicular ao centróide da bacia hidrográfica em km; e S a declividade do curso d'água principal em m·km⁻¹.

3.7 Processamento computacional

Para a modelagem dos hidrogramas foi utilizado o software HEC-HMS versão 4.2.1, desenvolvido pela USACE em 2017. A Figura 27 ilustra um diagrama hierárquico do funcionamento do software para uma melhor compreensão de sua estrutura, sendo que as etapas e os métodos usados neste estudo estão destacados em vermelho.

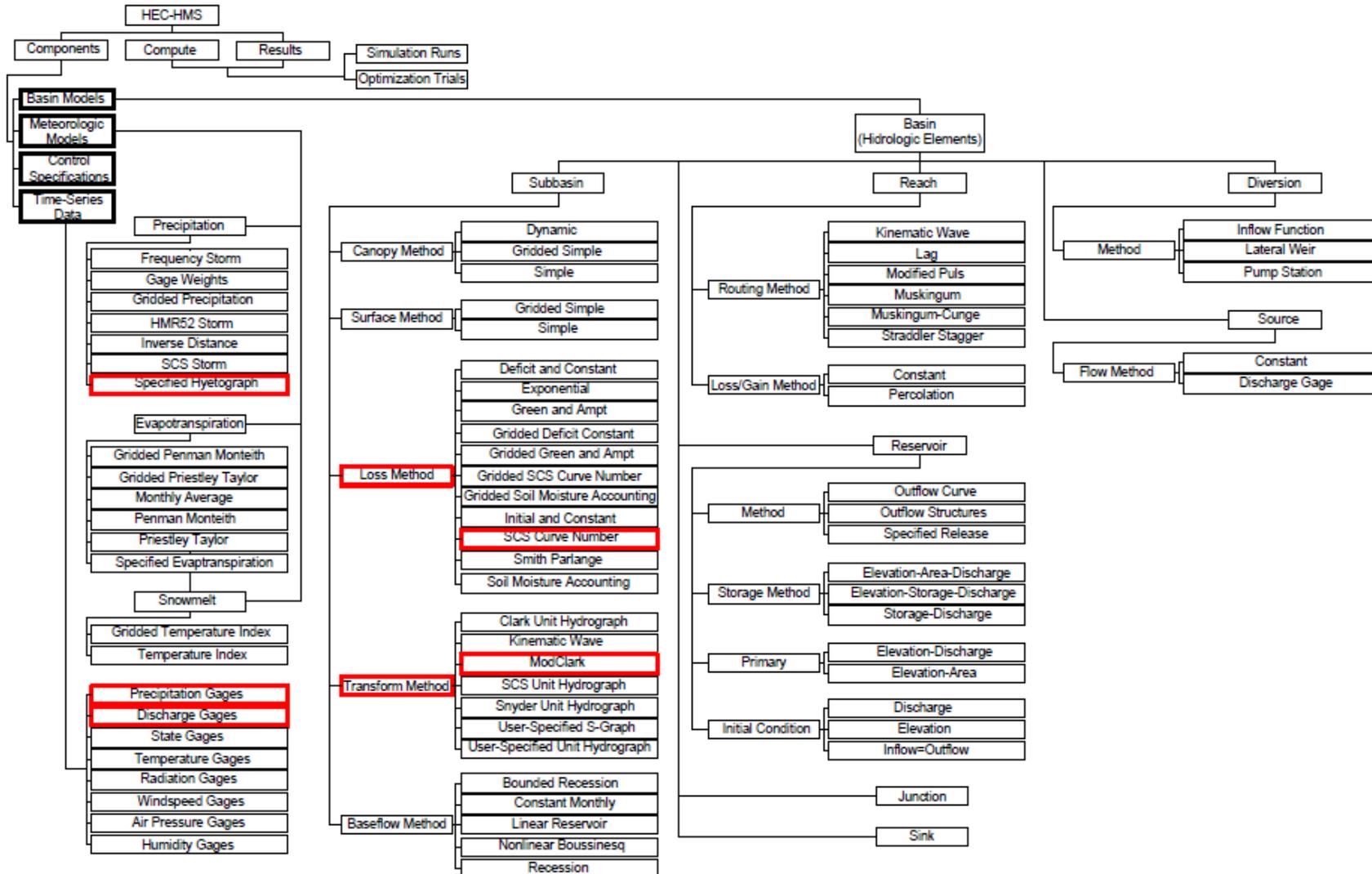


Figura 27- Diagrama hierárquico de processos envolvidos na modelagem hidrológica utilizando o HEC-HMS, sendo que as etapas e os métodos usados neste estudo estão enfatizados em vermelho.

Fonte: Steinmetz (2017).

Conforme analisado no diagrama, a modelagem hidrológica no HEC-HMS engloba a utilização de quatro componentes: Basin Model, Meteorologic Model, Control Specification e time-series data. O componente Basin Model define a representação física da bacia, por isso é o componente mais importante do modelo. As Figuras 28 e 29 ilustram os elementos hidrológicos inseridos no software, tanto para a modelagem concentrada quanto para a modelagem semi-distribuída por sub-bacias, respectivamente.

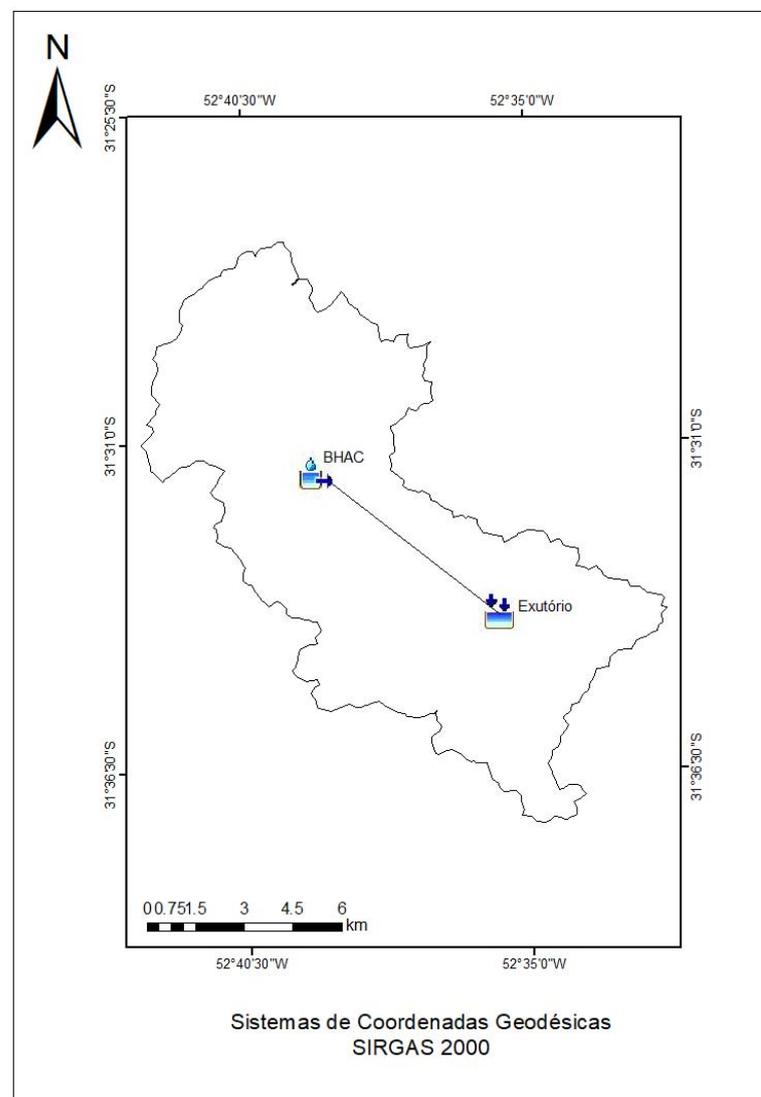


Figura 28 - Representação dos elementos da modelagem concentrada no software HEC-HMS

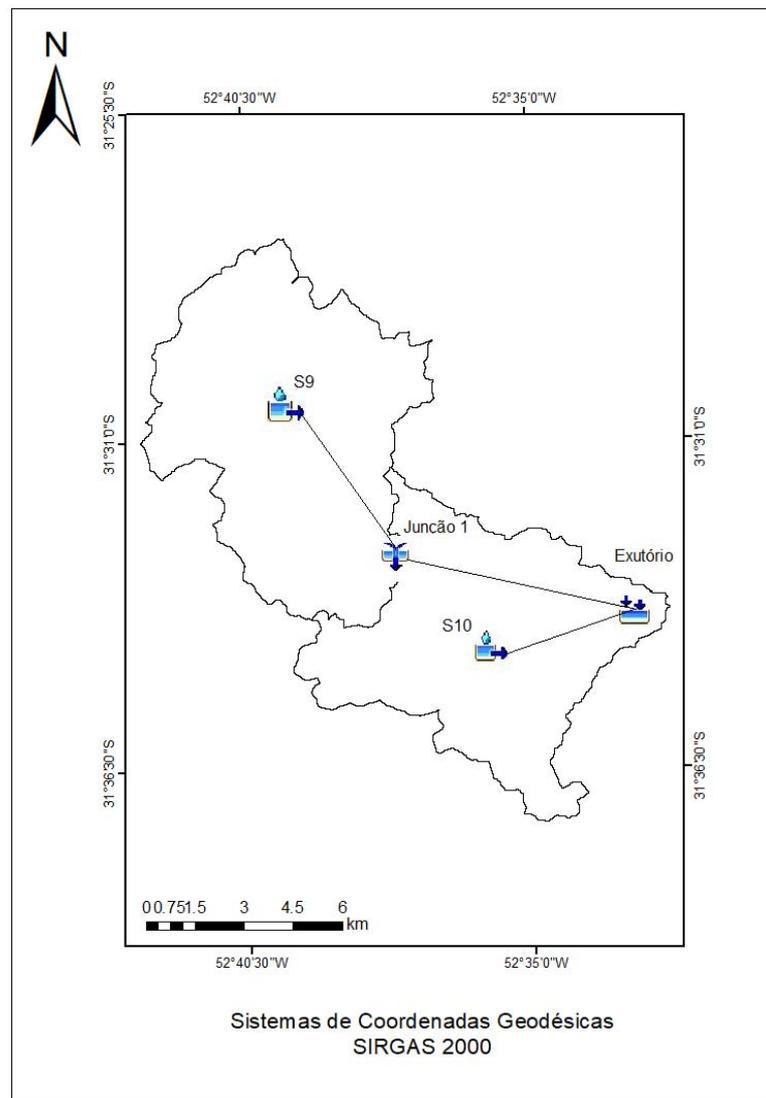


Figura 29 - Representação dos elementos da modelagem semi-distribuída no software HEC-HMS

No modelo meteorológico (Meteorologic Model), foi aplicado o hietograma específico de cada evento analisado. E nos dados de precipitação e vazão, pertencentes ao componente Time-Series Data, foi aplicado, para cada evento, o hietograma médio e o hidrograma observado na seção de controle monitorada na BHAC. Também foram considerados neste estudo os métodos de perda (loss method) e transformação (transform method). Dessa maneira, dentro do elemento subbasin no componente Basin Model, foi necessário definir dois módulos (perdas e transformação). O método de perda escolhido foi o NRCS-CN e o método de transformação foi o ModClark. Ressalta-se que toda a configuração utilizada para a BHAC também foi aplicada para as sub-bacias.

Para as modelagens, tanto para a BHAC quanto para as sub-bacias, os valores de t_c e R calculados pelas quatro propostas citadas anteriormente (seção 3.6.3), foram utilizados como dados de entrada no método de transformação do software HEC-HMS. Sendo assim, foram modelados quatro hidrogramas por evento. Para modelagem de hidrogramas de ESD, são recomendadas comparações visuais e estatísticas entre os hidrogramas simulados e observados (ASCE, 1993). Dessa maneira, foram aplicadas estatísticas para analisar qual dos hidrogramas modelados possuía o melhor desempenho, processo esse descrito na seção 3.8.

A modelagem semi-distribuída foi realizada levando em consideração duas sub-bacias por vez, ou seja, a bacia à montante da seção transversal em análise e a bacia a jusante da seção, conforme mencionado na seção 3.3. Este procedimento foi realizado com intuito de obter os parâmetros calibrados das bacias com maior precisão, sendo que quanto mais sub-bacias, maior o número de parâmetros a serem calibrados, fato este que dificulta o processamento (CALDEIRA, 2016).

A calibração de um modelo consiste no ajuste de um conjunto de parâmetros desconhecidos ou indiretamente mensuráveis para a bacia hidrográfica em análise (CALDEIRA, 2016). A etapa de calibração de parâmetros pode ser realizada pelo método da tentativa e erro ou por métodos automáticos. Em ambos os casos, o objetivo é encontrar valores para um conjunto de variáveis de modo a representar o fenômeno natural da forma mais realística, entretanto, na primeira metodologia, são testadas diferentes combinações, enquanto que na segunda, empregam-se métodos matemáticos de otimização (BESKOW, 2009; CALDEIRA, 2016).

Os valores do parâmetro I_a inseridos no software HEC-HMS foram obtidos analisando os eventos da bacia e das sub-bacias. Já os valores de CN foram calibrados por evento, visto que para a modelagem concentrada encontrou-se apenas um valor. Para a modelagem semi-distribuída foi determinado um valor para cada sub-bacia.

Os parâmetros do software HEC-HMS podem ser ajustados usando dois métodos de auto calibração, sendo estes: Univariate-Gradient (UG) e Nelder-Mead (NM). O método NM, é comumente usado para encontrar o mínimo ou o máximo de uma função objetiva em um espaço multidimensional, e é aplicado em problemas de otimização não-linear para os quais as derivadas não podem ser encontradas (NELDER; MEAD, 1965). O procedimento Downhill Simplex é adotado no método para avaliar simultaneamente todas as variáveis e determinar quais variáveis devem

ser ajustadas (SCHARFFENBERG; FLEMING, 2010). Já o método UG avalia e estima cada variável do modelo separadamente, enquanto mantém todas as demais variáveis constantes (SCHARFFENBERG; FLEMING, 2010). Sendo assim, no presente estudo, a calibração procedeu-se pelo método NM adotando como “função objetivo” do HEC-HMS, a raiz quadrada do erro quadrático médio (Root Mean Square Error – RMS), pois considerando tal função, a calibração ocorre identificando um conjunto ótimo de parâmetros minimizando a soma dos resíduos quadrados entre os dados observados e os dados simulados (MUNYANEZA *et al.*, 2014).

3.8 Análise de desempenho das calibrações do CN e dos hidrogramas modelados

Para analisar o desempenho dos modelos empregados nas bacias em estudo, bem como nas calibrações do CN, foi realizado a comparação do hidrograma estimado de escoamento superficial direto (ESD) com o observado para cada evento, por meio de estatísticas, sendo estes: coeficiente de Nash-Sutcliffe (C_{NS}); erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}); e erro relativo do tempo de pico (ER_{tp}).

Conforme Nash e Sutcliffe (1970), o C_{NS} expressa a eficiência da aplicação do modelo para estimativas, principalmente das vazões de cheias. Laouacheria e Mansouri (2015), relatam que um valor de C_{NS} igual à unidade significa um bom ajuste entre os hidrogramas (estimado e observado). Moriasi *et al.* (2007) sugerem a seguinte classificação para esse coeficiente: $C_{NS} > 0,65$, muito bom; $0,54 < C_{NS} < 0,65$, bom; $0,50 < C_{NS} < 0,54$, satisfatório. Valores de C_{NS} inferiores a 0,50, foram considerados como ajustes insatisfatórios.

O C_{NS} pode ser obtido por:

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{i_{obs}} - Q_{i_{est}})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{i_{obs}} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (19)$$

Onde $Q_{i_{obs}}$ é a vazão observada, em $m^3 \cdot s^{-1}$, no tempo $t=i$; $Q_{i_{est}}$ é a vazão estimada, em $m^3 \cdot s^{-1}$, no tempo $t=i$; \bar{Q}_{obs} é a vazão média observada em $m^3 \cdot s^{-1}$; e N é o número de ordenadas do hidrograma.

O ER_{Qp} relaciona as vazões de pico estimadas em relação às vazões de pico observadas (ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2013). Assim, quanto mais próximo de zero o valor deste coeficiente, melhor será a acurácia do modelo, ou seja, sem tendências nas estimativas (MORIASI *et al.*, 2007). Van Liew *et al.* (2007) apresentaram a seguinte classificação: $|ER_{Qp}| < 10\%$, muito bom; $10\% < |ER_{Qp}| < 15\%$, bom; $15\% < |ER_{Qp}| < 25\%$, satisfatório e $|ER_{Qp}| > 25\%$, inadequado.

A equação de tal coeficiente é apresentada por:

$$ER_{Qp} = \frac{(Q_{obs_p} - Q_{est_p})}{Q_{obs_p}} \cdot 100 \quad (20)$$

Onde Q_{obs_p} é a vazão de pico observada em $m^3 \cdot s^{-1}$; e Q_{est_p} é a vazão de pico estimada em $m^3 \cdot s^{-1}$.

Já o ER_{tp} relaciona o tempo das vazões de pico estimadas com o tempo das vazões de pico observadas. Da mesma forma que o teste anterior, quanto mais próximo de zero o valor de ER_{tp} , melhor será a acurácia do modelo. Sendo este estimado pela Equação 21:

$$ER_{tp} = \frac{(t_{obs} - t_{est})}{t_{obs}} \cdot 100 \quad (21)$$

Onde t_{obs} é o tempo da vazão de pico observado em s; e t_{est} é o tempo da vazão de pico estimado em s.

3.9 Modelagem hidráulica

3.9.1 Caracterização do canal principal: levantamento das seções topobatimétricas

Para a realização da simulação hidráulica da BHAC tornou-se necessário o levantamento das seções topobatimétricas ao longo do canal principal da bacia,

sendo que esses dados são utilizados para determinação do mapa de profundidade e perfis batimétricos da área de interesse.

A locação das seções transversais foi efetuada após uma visita de reconhecimento a campo, procurando fazer uma análise qualitativa das singularidades do trecho fluvial que influem sobre a forma e as características da cheia, tais como mudanças de declividade do fundo do canal, presença de pontes, obstruções, alargamentos e estreitamentos do canal (SILVA; MASCARENHAS; MIGUEZ, 2007).

O levantamento das seções foi realizado por meio do equipamento Estação Total (marca Sokkia, modelo SET630RK), levando em consideração o detalhamento a partir das margens do rio até o seu leito. A identificação das seções e as respectivas coordenadas das margens esquerda e direita bem como o comprimento de cada seção transversal estão apresentadas na Figura 30 e Tabela 6, respectivamente.

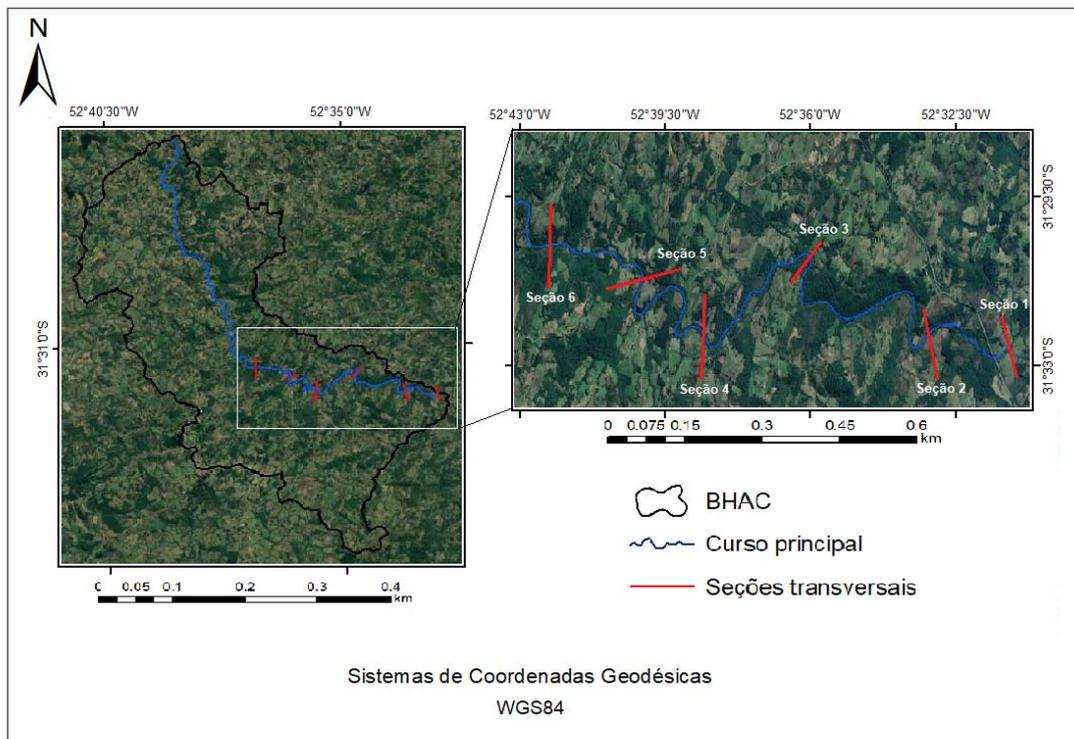


Figura 30 - Localização das seções transversais ao longo da BHAC.

Tabela 6 – Coordenadas das margens esquerda e direita das seções transversais

Seção	Comprimento (m)	Margem Esquerda		Margem Direita	
		Coord. E (m)	Coord. N (m)	Coord. E (m)	Coord. N (m)
1	28,58	353463,16	6507361,28	353478,45	6507353,27
2	32,15	351783,46	6507240,85	351769,32	6507227,56
3	17,60	350083,31	6508191,48	350072,40	6508185,53
4	22,96	348387,30	6507145,00	348399,00	6507159,00
5	20,40	347098,82	6507404,70	347091,82	6507388,09
6	11,80	345585,37	6508228,76	345585,00	6508211,00

Para o georreferenciamento destes dados foram utilizados receptores GNSS (Sistemas Globais de Navegação por Satélite), no qual foram rastreados dois pontos em cada seção estabelecida, sendo um destinado para o posicionamento da Estação Total e o outro para a leitura de RÉ. Vale ressaltar, que estes pontos rastreados foram processados via Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), usando como base a estação do Capão do Leão/RS – RSPE (SAT 96172) e que todas as seções transversais levantadas foram referenciadas ao mesmo datum geodésico da base planialtimétrica (SIRGAS 2000).

Para o processamento dos dados foi utilizado o software GNSS solutions versão 3.70.5 com licença livre para utilização em 30 dias, permitindo a obtenção das coordenadas geodésicas e altitudes elipsoidais dos pontos rastreados. Em seguida, para maiores facilidades de cálculos, as coordenadas geodésicas foram convertidas para coordenadas planas UTM (Universal Transversa de Mercator), através do software ProGrid. As altitudes elipsoidais também foram convertidas, através do software MAPGEO2015, para altitudes ortométricas, por meio da obtenção da ondulação geoidal. Ambos os softwares, ProGrid e MAPGEO2015, são fornecidos gratuitamente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

3.9.2 Processamento computacional

É necessário informar ao software HEC-RAS, como dados de entrada, as vazões de pico dos hidrogramas simulados referentes às seções transversais levantadas ao longo do canal principal da BHAC. Além destes dados, também foi necessário informar os dados topobatimétricos das referidas seções transversais bem como os valores do coeficiente de rugosidade.

O software HEC-RAS possui um recurso de interpolação de seções transversais ao longo do trecho fluvial. Segundo Coutinho (2015), a interpolação de seções é necessária para permitir uma melhor estabilidade e precisão numérica do software. Para estimar o perfil das mudanças no nível da linha de água entre as seções transversais, o software HEC-RAS utiliza um método numérico proposto por Maidment (1993), denominado de “Standard Step Method” (SILVA; MASCARENHAS; MIGUEZ, 2007), por meio da Equação da Energia (Equação 22) e da Equação da Continuidade (Equação 23) (BAPTISTA; COELHO, 2014), respectivamente.

$$Z_2 + Y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_e \quad (22)$$

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (23)$$

Onde, Y_1 e Y_2 e são profundidades do escoamento nas seções transversais em m; Z_1 e Z_2 são cotas do fundo do canal nestas seções em m; V_1 e V_2 são velocidades médias do escoamento nas seções em $m \cdot s^{-1}$; α_1 e α_2 são coeficientes de Coriolis; g é a aceleração da gravidade em $m \cdot s^{-2}$; h_e é a perda de carga em m; Q é a vazão em $m^3 \cdot s^{-1}$; e a A é a área da seção transversal em m^2 . A Figura 31 mostra os termos utilizados na Equação 22, considerando que as seções transversais da direita para a esquerda representam seções a jusante e à montante, respectivamente.

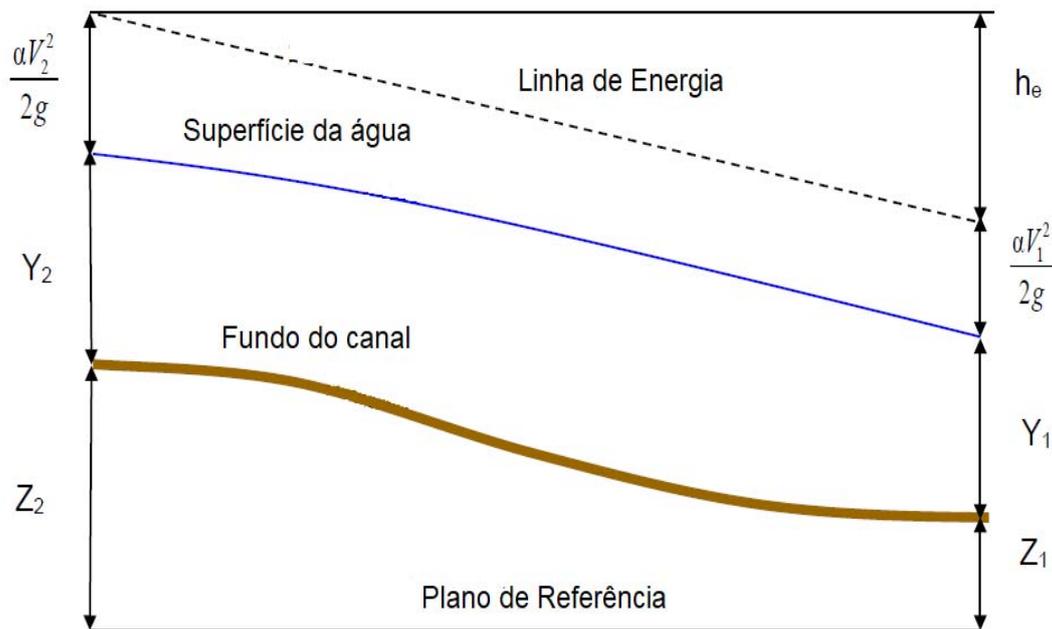


Figura 31 – Representação dos termos da Equação da Energia.
Fonte: Adaptado de USACE (2016).

Para determinar o transporte de vazão total e o coeficiente de velocidade para cada seção transversal, o modelo subdivide o escoamento em subseções com valores distintos de coeficiente de rugosidade (BRUNNER, 2016). A velocidade é tratada em termos de seu valor médio em cada seção transversal. Esta velocidade média é corrigida por um fator de correção que permite considerar as irregularidades da distribuição de velocidade em um modelo unidimensional (GRACIOSA, 2010), através do coeficiente de Coriolis:

$$\alpha = \frac{Q_1 \cdot V_1^2 + Q_2 \cdot V_2^2 + \dots + Q_i \cdot V_i^2}{Q \cdot \bar{V}^2} \quad (24)$$

Onde V_i é a velocidade em cada subseção em $m \cdot s^{-1}$; e \bar{V} a velocidade média de todas as subseções em $m \cdot s^{-1}$.

As perdas de cargas entre as seções transversais são consideradas como compostas por fricção do fluido com as paredes do canal e por perdas adicionais devido à expansão ou contração das seções transversais (BRUNNER, 2016). O software calcula as perdas de carga a partir da Equação 25.

$$h_e = L \cdot \bar{S}_f + C \cdot \left| \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} \right| \quad (25)$$

Onde L é o comprimento do trecho ponderado pela vazão entre as seções em m; \bar{S}_f declividade da linha de energia entre as seções $m \cdot m^{-1}$; e C o coeficiente de perda de carga por expansão e contração das seções.

O comprimento do trecho (L) é calculado pela Equação 26:

$$L = \frac{L_e \cdot \bar{Q}_e + L_c \cdot \bar{Q}_c + L_d \cdot \bar{Q}_d}{\bar{Q}_e + \bar{Q}_c + \bar{Q}_d} \quad (26)$$

Onde L_e , L_c e L_d representam, respectivamente, os comprimentos entre as seções transversais para o escoamento na margem esquerda, no canal principal e na margem direita; e \bar{Q}_e , \bar{Q}_c e \bar{Q}_d , correspondem às médias aritméticas das vazões entre as seções para a margem esquerda, canal principal e margem direita, respectivamente em $m^3 \cdot s^{-1}$.

Já a declividade da linha de energia entre as seções é determinada a partir da equação de Manning (BRUNNER, 2016):

$$Q = A \cdot R_h^{2/3} \cdot \frac{\bar{S}_f^{1/2}}{n} \quad (27)$$

Onde n é o coeficiente de rugosidade de Manning em $s \cdot m^{-1/3}$; A é a área molhada da seção transversal em m^2 ; e R_h é o raio hidráulico em m. Rearranjando a equação, tem-se:

$$\bar{S}_f = \frac{n^2 \cdot Q^2}{A^2 \cdot R_h^{4/3}} \quad (28)$$

Já o raio hidráulico (R_h) é obtido pela Equação 29:

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (29)$$

Onde P é o perímetro molhado da seção transversal em m.

3.9.3 Coeficiente de rugosidade

Além dos dados das vazões de pico e dos dados do levantamento topobatimétrico (altitudes e distâncias), também foi necessário inserir no software o valor do coeficiente de rugosidade para cada seção transversal. De acordo com Kim *et al.* (2013), o coeficiente de rugosidade é comumente utilizado em modelagens numéricas para estudar o comportamento hidráulico de rios, gerar simulações para construção de mapas de inundação e realização de projetos de estruturas hidráulicas, como pontes e barragens, entre outras aplicações. A equação adotada para a determinação dos coeficientes de rugosidade foi a de Manning, a mesma utilizada para o cálculo da declividade da linha de energia pelo software HEC-RAS (Equação 27), disposta na seção anterior 3.9.2. A determinação do coeficiente em questão foi realizada considerando cada trecho entre duas seções, conforme o estudo realizado por Lyra *et al.* (2010). Rearranjando a Equação 27 tem-se:

$$n = \frac{A \cdot R_h^{2/3} \cdot \bar{S}_f^{1/2}}{Q} \quad (30)$$

O valor do coeficiente de rugosidade de Manning pode variar entre o leito principal e a planície de inundação, entretanto, no presente estudo, assumiu-se que o valor encontrado é equivalente para toda a seção transversal, conforme adotado no estudo de Lyra *et al.* (2010).

Para a determinação do coeficiente de rugosidade de Manning foi necessário realizar campanhas de campo para a obtenção dos parâmetros necessários da Equação 30. As campanhas de campo foram realizadas com o auxílio dos equipamentos de medição de velocidade (molinete) e de medição de nível. Foi realizado duas medições de velocidade em cada seção transversal com intuito de calcular a vazão, sendo que em cada medição era registrado o nível de água. Para o

cálculo da área e do perímetro de cada seção transversal foi utilizado o software específico do equipamento de medição de velocidade. O dado referente ao nível de água nas seções foi necessário para o cálculo do número de Froude (Fr) para determinar o regime de escoamento trecho a trecho entre as seções, conforme a Equação 31, sendo essa informação necessária para a simulação do perfil longitudinal da linha d'água.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot y_h}} \quad (31)$$

Onde U é a velocidade do fluxo do canal em $m \cdot s^{-1}$; g é aceleração da gravidade em $m \cdot s^{-2}$; e y_h a profundidade do fluxo do canal em m.

O Número de Froude classifica o regime de escoamento em subcrítico, supercrítico e crítico. Quando Fr é menor que 1 o regime do rio é denominado de subcrítico (regime lento), entretanto quando Fr é maior que 1 o regime é denominado de supercrítico (regime rápido). Já quando o Fr é igual a 1 o escoamento é denominado de crítico, ou seja, quando há mudança de regime (BAPTISTA; LARA, 2002).

Ressalta-se que para o cálculo do coeficiente de Manning foi considerado um escoamento uniforme entre as seções. Sendo assim, a linha de energia, superfície livre d'água e fundo do canal foram considerados paralelos, ou seja, com a mesma declividade (BAPTISTA; LARA, 2002).

4 Resultados e Discussão

4.1 Características dos eventos chuva x escoamento analisados

Foram selecionados 8 eventos de chuva x escoamento com o objetivo de descrever os diferentes cenários de respostas hidrológicas na BHAC, visto que cada um dos eventos apresentou hidrograma unimodal, ou seja, com apenas um pico de vazão, apresentando períodos de ascensão e recessão significativos para análise de cheias (RAGHUNATH, 2006). Na Tabela 7 estão dispostas as informações referentes a cada evento selecionado.

Tabela 7 - Caracterização dos eventos empregados na modelagem de cheias, referentes a precipitação totais (P_{Total}), intensidade média (i_m), intensidade máxima ($i_{máx}$) e a vazão total máxima ($Q_{Total_máx}$)

Evento	Início		Fim		P_{Total} (mm)	i_m (mm·h ⁻¹)	$i_{máx}$ (mm·h ⁻¹)	$Q_{Total_máx}$ (m ³ ·s ⁻¹)
	Data	Hora	Data	Hora				
E1	19/07/2015	06:55	21/07/2015	08:25	112,7	2,6	16,6	53,1
E2	21/09/2015	06:25	22/09/2015	07:55	47,6	1,4	13,8	21,7
E3	20/10/2015	06:55	21/10/2015	01:25	37,3	9,4	24,6	38,4
E4	13/11/2015	03:25	13/11/2015	22:25	18,4	3,1	14,8	15,4
E5	18/12/2015	10:25	19/12/2015	08:55	31,6	3,5	24,7	18,5
E6	01/11/2016	19:25	02/11/2016	23:25	51,54	3,8	34,3	23,4
E7	23/02/2017	14:20	24/02/2017	09:20	27,1	3,6	24,8	39,5
E8	12/03/2017	01:30	13/03/2017	13:00	32,7	2,4	15,1	12,0

Analisando a Tabela 7, observa-se que a P_{Total} mostrou uma variação de aproximadamente 95mm entre os eventos, visto que o menor valor foi de 18,4mm para o evento 4 e maior valor de 112,7mm para o evento 1. Os valores da i_m variaram de 1,4mm·h⁻¹ para o evento 2 a 9,4mm·h⁻¹ para o evento 3. Já os valores de $i_{máx}$ variaram de 13,8mm·h⁻¹ a 34,3mm·h⁻¹, para o evento 2 e evento 6, respectivamente. Em relação a vazão máxima total houve uma variação de aproximadamente 40m³·s⁻¹ entre os eventos, onde o menor valor foi para o evento 8 com 12,0m³·s⁻¹ e maior valor para o evento 1 com 53,1m³·s⁻¹. Analisando unicamente os valores de i_m , constata-se que não houve uma perfeita correspondência com a $Q_{Total_máx}$. Porém, analisando em conjunto com a P_{Total} ,

pode-se observar que existe uma ligeira tendência da $Q_{\text{Total_máx}}$ aumentar com o crescimento da P_{Total} e i_m .

Conforme Bertoni e Lombardi Neto (2014), a intensidade, duração e frequência da chuva influencia significativamente no volume e velocidade do escoamento superficial, visto que a intensidade é o fator pluviométrico mais importante, pois está intimamente ligada ao processo erosivo. A água irá infiltrar no solo por um período maior, dependendo das condições de umidade em que o solo se encontra, quando a intensidade da chuva for menor. Em seguida iniciará o escoamento superficial, aumentando o volume de água na encosta da bacia. Segundo Avanzi (2005), a intensidade de um evento de chuva pode ultrapassar a capacidade de infiltração de água no solo quando essa intensidade for alta, resultando em um maior volume de enxurrada e maior taxa erosiva, e consequentemente influenciando na quantidade de sedimentos transportados.

Segundo Ibrahim-Bathis e Ahmed (2016), existem diversas incógnitas presentes na bacia hidrográfica que variam espacialmente e temporalmente. Contudo, a chuva é uma das variáveis mais importantes e é a que gera maiores incertezas. O padrão de precipitação da região que abrange a bacia em estudo apresenta o tipo de chuva frontal, com normalmente maiores durações e menores intensidades, sendo bem distribuídas ao longo do ano. Salienta-se que a boa distribuição pluviométrica no estado do Rio Grande do Sul está associada à ocorrência de frentes frias praticamente durante todo o ano (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

4.2 Escoamento superficial direto (ESD) e Precipitação efetiva (P_e)

Conforme mencionado na seção 3.5.2, a separação do escoamento proporcionou, além da obtenção do hidrograma de ESD, também a quantificação da P_e de cada evento analisado. Na Tabela 8 é possível observar as vazões de pico (Q_p) de cada hidrograma de ESD, bem como a precipitação efetiva (P_e) e sua parcela na precipitação total para os 8 eventos selecionados.

Tabela 8 - Características do hidrograma de ESD para cada evento analisado na BHAC

Evento	Q_p ($m^3 \cdot s^{-1}$)	P_e (mm)	Parcela da P_{TOTAL} (%)
E1	50,5	24,5	21,7
E2	17,9	5,1	10,8
E3	33,6	6,9	18,6
E4	12,1	2,6	14,1
E5	16,2	3,2	10,0
E6	21,8	6,5	12,6
E7	38,2	4,3	16,0
E8	10,8	3,3	10,1

Analisando a Tabela 8, pode-se observar que a Q_p teve uma variação significativa de $10,8 m^3 \cdot s^{-1}$ a $50,5 m^3 \cdot s^{-1}$ e a P_e de 2,6mm a 24,5 mm. Essa variação possibilita analisar os diferentes cenários propostos pelos eventos de chuva selecionados, fato esse importante para a modelagem dos hidrogramas. A parcela de P_{TOTAL} referente à P_e variou de 10,0% a 21,7%. Vale ressaltar que o conhecimento da P_e total de cada evento foi essencial para a caracterização da variabilidade temporal e de intensidade da P_e , o que possibilitou estabelecer os hidrogramas de precipitação efetiva de cada evento.

4.3 Modelagem hidrológica

4.3.1 Calibração do modelo

Para os dois cenários da modelagem, foi considerado como um dos dados de entrada os valores calibrados de CN referentes a cada evento. A utilização do CN calibrado por evento garante que a precipitação efetiva total do evento seja igual, em lâmina, ao ESD monitorado na seção de controle para o mesmo evento, fato este importante quando se trata de modelagem semi-distribuída por sub-bacias. Para a calibração do CN, foi levado em consideração também a calibração dos parâmetros t_c e R do modelo geomorfológico de Clark para cada evento, visando à distribuição do erro entre os três parâmetros devido aos seus valores iniciais inseridos no software HEC-HMS. Entretanto, não foram utilizados os valores calibrados de t_c e R para as simulações, e sim os valores calculados pelas quatro propostas geomorfológicas apresentadas na seção 3.6.3, pois o interesse do referido estudo foi verificar o desempenho de tais propostas.

Na Tabela 9 é possível observar os valores calibrados de CN, referente às duas modelagens (concentrada e semi-distribuída), de cada evento.

Tabela 9 - Valores calibrados do Número da Curva (CN) para a modelagem concentrada e semi-distribuída para cada evento

Bacias	CN							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
BHAC	56	72	87	87	79	82	74	86
S1	58	71	90	87	72	81	71	87
S2	47	57	80	88	63	84	71	83
S3	55	65	83	87	64	74	70	81
S4	53	77	84	90	89	78	68	86
S5	51	77	80	85	66	83	67	67
S6	48	61	77	89	67	79	67	76
S7	57	62	78	88	80	69	67	88
S8	52	66	89	90	80	85	66	78
S9	54	63	81	77	68	69	60	82
S10	59	67	90	92	77	86	65	89

Analisando os valores de CN calibrados para o cenário 1, é possível observar que houve uma variação considerável nos valores entre os eventos (56 a 87), visto que, quando menor o valor de CN, maior será a capacidade de armazenamento de água do solo e que quanto maior o valor de CN, menor será a infiltração de água no solo, e conseqüentemente, maior será o ESD gerado. Já os valores de CN calibrados pela modelagem semi-distribuída não variaram muito entre as sub-bacias, quando analisados cada evento separadamente. Entretanto, os valores se diferiram, consideravelmente, quando comparados para uma mesma sub-bacia, devido à espacialização da chuva, bem como às características de armazenamento do solo.

Nas Tabelas 10-12, é possível verificar as estatísticas das calibrações dos CNs referentes à BHAC e para cada conjunto de sub-bacias (sub-bacia à montante e jusante de cada seção transversal). Destaca-se que para cada conjunto de sub-bacias, obteve-se um conjunto de calibração referente aos 8 eventos chuva-vazão utilizados no presente estudo, o mesmo se aplica a bacia do arroio Cadeia como um todo. Sendo assim, no total, foram realizadas 6 calibrações, 1 referente a BHAC e as outras 5 referentes aos conjuntos de sub-bacias.

Tabela 10 - Valores das estatísticas da calibração dos CNs para a BHAC como um todo (calibração 1) e para o conjunto das sub-bacias S1 e S2 (calibração 2)

Evento	Calibração 1			Calibração 2		
	C _{NS}	ER _{Qp} (%)	ER _{tp} (%)	C _{NS}	ER _{Qp} (%)	ER _{tp} (%)
E1	0,94	2,19	75,00	0,94	0,29	75,00
E2	0,89	18,00	9,52	0,91	15,09	9,52
E3	0,97	7,00	10,00	0,94	8,92	10,00
E4	0,92	4,80	0,00	0,86	16,16	9,09
E5	0,96	4,40	10,00	0,58	43,29	0,00
E6	0,99	2,99	10,00	0,99	1,68	10,00
E7	0,98	3,05	25,00	0,99	0,70	25,00
E8	0,99	2,62	0,00	0,95	2,87	0,00

Tabela 11 - Valores das estatísticas da calibração dos CNs para o conjunto das sub-bacias S3 e S4 (calibração 3) e para o conjunto S5 e S6 (calibração 4)

Evento	Calibração 3			Calibração 4		
	C _{NS}	ER _{Qp} (%)	ER _{tp} (%)	C _{NS}	ER _{Qp} (%)	ER _{tp} (%)
E1	0,95	3,94	75,00	0,94	3,02	43,75
E2	0,93	1,48	4,76	0,50	11,18	14,29
E3	0,94	9,37	10,00	0,89	21,98	0,00
E4	0,96	1,88	9,09	0,89	0,71	9,09
E5	0,94	14,80	20,00	0,95	4,81	10,00
E6	0,86	0,72	20,00	0,79	6,57	10,00
E7	0,99	1,21	25,00	0,99	0,57	25,00
E8	0,95	8,63	0,00	0,92	13,71	5,88

Tabela 12 - Valores das estatísticas da calibração dos CNs para o conjunto das sub-bacias S7 e S8 (calibração 5) e para o conjunto S9 e S10 (calibração 6)

Evento	Calibração 5			Calibração 6		
	C _{NS}	ER _{Qp} (%)	ER _{tp} (%)	C _{NS}	ER _{Qp} (%)	ER _{tp} (%)
E1	0,96	4,90	6,25	0,94	0,42	75,00
E2	0,93	13,32	9,52	0,96	1,49	9,52
E3	0,96	6,59	30,00	0,98	2,92	10,00
E4	0,90	0,79	9,09	0,92	0,48	0,00
E5	0,94	2,70	10,00	0,85	15,46	20,00
E6	0,98	4,31	10,00	0,94	7,81	20,00
E7	0,99	0,36	25,00	0,99	1,75	25,00
E8	0,99	4,60	0,00	0,81	7,73	35,29

Os valores calibrados de CN, para os dois cenários, resultaram em ótimos desempenhos, onde para a maioria dos eventos os valores de C_{NS} foram maiores que 0,65, o qual, conforme Moriasi *et al.* (2007), se enquadra na classificação de

“muito bom”, exceto para o evento 5 da calibração 2 e para o evento 2 da calibração 4, ficando enquadrado como “bom” e “satisfatório”, respectivamente.

Para os valores de ER_{qp} a maioria dos percentuais foram menores que 10%, se enquadrando na classificação de “muito bom” (VAN LIEW *et al.*, 2015), exceto para o evento 2 da calibração 1 e 2, evento 4 da calibração 2, evento 5 da calibração 3, evento 2, 3 e 8 da calibração 4, evento 2 da calibração 5 e evento 5 da calibração 6, que obtiveram percentuais entre 10% e 15%, se enquadrando na classificação “bom”. Apenas o evento 5 da calibração 2 que obteve resultados inadequados, com um percentual de 43, 29%.

Já em relação aos valores de ER_{tp} , a maioria dos eventos obtiveram percentuais baixo, demonstrando a boa acurácia da calibração, visto que quanto mais próximo de zero o valor de tal estatística melhor a relação do tempo das vazões de pico estimadas com o tempo das vazões de pico observadas. Apenas o evento 1 para a calibração 1, 2, 3, 4 e 6 e o evento 3 para a calibração 5, obtiveram os maiores percentuais entre os eventos considerando cada calibração individualmente.

Conforme as estatísticas apresentadas é possível constatar a eficiência da calibração do modelo, indicando que os valores dos CNs obtidos foram apropriados para a realização das simulações executadas neste estudo (concentrada e semi-distribuída).

No estudo de Dariane, Javadianzadeh e James (2016), o método de auto calibração usando o algoritmo de NM, de duas sub-bacias da Bacia de Ajichai localizada no noroeste do Irã, propiciou os melhores desempenhos em relação ao método de auto-calibração usando o algoritmo de UG. Joo *et al.* (2013), também utilizaram o algoritmo de NM para calibrar os parâmetros para a simulação. Segundo Scharffenberg e Flemin (2010), o algoritmo de NM, apesar de depender de maior tempo para a calibração, fornece resultados mais precisos.

4.3.2 Parametrização para a modelagem concentrada (cenário 1) e modelagem semi-distribuída (cenário 2)

Além dos valores calibrados de CN também foram utilizados como dados de entrada os valores de I_a e os valores dos parâmetros do tempo de concentração (t_c) e coeficiente de armazenamento (R). Vale salientar que o equacionamento utilizado

para estimar t_c e R exerce grande impacto na modelagem, influenciando o desempenho da simulação. Por isso, neste estudo, avaliou-se o desempenho de quatro propostas, relacionando as características geomorfológicas da BHAC, com os parâmetros do HUI modificado de Clark.

Nas Tabelas 13 e 14 é possível observar os valores de t_c e R para cada proposta empregada e os valores de I_a observados para cada evento, respectivamente, referente ao cenário 1.

Tabela 13 - Valores de t_c e R para as propostas geomorfológicas empregada neste estudo, considerando a modelagem concentrada (cenário 1)

Proposta	t_c (h)	R (h)
P1	8,4	2,5
P2	8,5	8,7
P3	3,8	1,8
P4	7,0	3,0

Tabela 14 - Valores das abstrações iniciais (I_a) para cada evento, considerando a modelagem concentrada (cenário 1)

Evento	I_a (mm)
E1	15,1
E2	11,0
E3	8,5
E4	3,2
E5	7,5
E6	14,2
E7	2,6
E8	9,7

Os valores obtidos de t_c variaram de 3,8h a 8,5h e de R entre 1,8h a 8,7h. Em relação aos valores de I_a , houve uma variação entre 2,6mm a 15,1mm. Segundo Steinmetz (2017), quanto menor o valor de I_a , considerando um mesmo evento de chuva, mais rapidamente ocorrerá a transformação de precipitação em ESD. Já o parâmetro t_c indica o tempo necessário que a água precipitada leva, no ponto mais distante da bacia, para deslocar-se, na forma de ESD, até a seção de controle. O parâmetro R representa o tempo de armazenamento do ESD dentro da bacia.

Assim, como para a modelagem concentrada, para a modelagem semi-distribuída também foi considerado, além dos dados calibrados de CN, os valores de I_a e os valores dos parâmetros t_c e R, dispostos nas Tabelas 15 e 16. Salienta-

se que os valores de t_c foram recalculados conforme a metodologia mencionada na seção 3.5.3, visto que esta distribuição foi ao longo de cada sub-bacia.

Tabela 15 - Valores de t_c e R para as propostas geomorfológicas empregadas neste estudo, considerando a modelagem semi-distribuída (cenário 2)

Sub-bacias	t_c (h)				R (h)			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
S1	7,5	6,9	3,2	16,4	2,2	7,5	1,2	8,1
S2	1,2	1,8	1,6	8,6	2,5	5,0	0,8	6,2
S3	5,6	5,1	3,1	13,6	1,6	6,6	1,2	5,4
S4	2,4	2,3	1,9	8,6	1,9	4,4	0,8	5,2
S5	5,6	4,9	3,1	13,2	1,6	6,3	1,2	5,5
S6	2,1	2,6	2,0	8,3	2,0	5,2	0,8	4,4
S7	5,1	4,3	2,9	11,7	1,6	5,7	1,2	4,9
S8	4,0	4,3	2,4	11,6	2,6	6,3	0,9	6,9
S9	3,8	3,2	2,8	10,3	1,2	5,1	1,2	3,6
S10	5,2	5,1	2,5	11,9	2,6	6,5	0,9	6,6

Tabela 16 - Valores das abstrações iniciais (I_a) para cada evento, considerando a modelagem semi-distribuída (cenário 2)

Evento	I_a (mm)									
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
1	13,8	21,6	13,1	8,9	12,5	8,6	15,0	8,1	15,6	20,4
2	10,0	8,2	9,3	8,6	16,0	15,9	8,6	6,6	15,4	2,5
3	10,0	5,5	9,4	5,7	9,5	2,3	12,3	3,2	17,8	2,4
4	3,3	2,9	4,3	2,9	6,8	3,0	5,3	3,0	6,1	1,1
5	7,4	7,8	7,3	8,1	8,9	7,9	12,5	3,5	11,2	3,3
6	13,3	18,4	12,5	19,9	17,2	12,2	14,2	9,2	18,4	5,5
7	2,9	0,8	3,0	1,0	4,2	0,9	3,9	0,7	4,1	0,7
8	9,6	10,1	10,5	10,3	9,4	10,1	9,4	11,3	9,4	10,0

Em relação aos valores calculados, nota-se uma variação nos valores de t_c entre as sub-bacias, onde os valores tendem a diminuir à medida que diminui a área de drenagem da sub-bacia, conforme constata-se a seguir: a) Sub-bacias à montante das seções transversais: S1, S3, S5, S7 e S9, sendo a S1 com a maior área (100,6km²) e a S9 com a menor área (65,3km²); e b) Sub-bacias a jusante das seções transversais: S10, S8, S6, S4, e S2, sendo a S10 a sub-bacia com a maior área (55,8km²) e a S2 com a menor área (20,6km²). Sendo assim, deduz-se que a S9 e a S2 levam o menor tempo para que todo o ESD produzido seja deslocado até a sua seção de controle em relação às demais sub-bacias.

Analisando os outros coeficientes adotados nas equações das propostas geomorfológicas para a determinação de t_c , observou-se, para a P1, P2 e P4, que,

conforme o comprimento do curso principal da sub-bacia decresce, os valores de t_c também decrescem. Isso também ocorreu para a P3, entretanto, levando em consideração a declividade média da bacia.

No tocante aos valores obtidos entre as propostas, os menores valores foram para a P3 e os maiores valores para a P4. Ressalta-se que os mesmos variaram devido aos coeficientes adotados em cada equação, por exemplo, a P1, P2 e P4 adotam a declividade média do curso principal, já a P3 adota a declividade média da bacia, além de algumas propostas adotarem mais coeficientes do que outras, por exemplo, a P4 além de considerar o comprimento do curso principal (L), também considera o comprimento medido do ponto de concentração ao longo de L até um ponto em L perpendicular ao centroide da bacia hidrográfica (L_{ca}).

De forma similar ao que ocorreu para os valores de t_c , também ocorreu para o parâmetro R . Os menores valores, considerando cada conjunto de simulação, também foram para as sub-bacias com as menores áreas (S2, S4, S6, S8, S10), já os maiores valores para as sub-bacias com as maiores áreas (S1, S3, S5, S7, S9). Sendo assim, as sub-bacias delimitadas à montante das seções transversais possuem maior tempo de armazenamento do ESD do que as sub-bacias delimitadas a jusante das seções. Em relação a I_a os valores também foram variáveis, tanto entre as sub-bacias quanto para a mesma sub-bacia, sendo este comportamento esperado, pois foram obtidos a partir do hietograma médio de cada sub-bacia para um mesmo evento.

Vale ressaltar que a abstração inicial é uma parcela da precipitação total que ocorre anteriormente à precipitação efetiva, referindo-se àquela quantidade de chuva produzida desde o seu início até que haja início de escoamento superficial direto na seção de controle (SHEEDER; ROSS; CARLSON, 2002). Em estudo realizado por Mello *et al.* (2003), cujo o objetivo foi estudar as abstrações iniciais das precipitações ocorridas em uma microbacia localizada no sul do estado de Minas Gerais, os autores constataram que a razão entre a abstração inicial (I_a) e o potencial de armazenamento de água no solo (S) apresentou valor médio de 0,0155, ou seja, a abstração corresponde, em média, apenas 1,55% do valor de S . Este valor é muito inferior aos 20% sugerido pelo método CN, demonstrando que para a determinação do I_a não se deve considerar apenas o potencial de armazenamento, mas é imprescindível que se verifique a influência de variáveis hidrológicas no processo, especialmente a precipitação (MELLO *et al.*, 2003).

Foram feitas buscas por estudos que tenham utilizado as propostas geomorfológicas empregadas neste trabalho a fim de comparar os parâmetros obtidos e, conseqüentemente, verificar o desempenho dos hidrogramas de ESD simulados. Entretanto, foram encontradas poucas aplicações na literatura em relação às propostas o que dificultou a discussão com os resultados observados. Dessa maneira, foram selecionados alguns trabalhos com intuito de comparar as características morformétricas das bacias dos mesmos com a bacia e sub-bacias do arroio Cadeia, bem como o desempenho das propostas quando aplicada nas simulações dos hidrogramas referente à acurácia dos parâmetros t_c e R .

Sheridan (1994) e Silveira (2005), estudaram o desempenho de equações de tempo de concentração (t_c) aplicadas no rio Little, localizado nos EUA, e em bacias rurais e urbanas de Illinois, Califórnia, Arizona e EUA, respectivamente. Dentre estas equações foi analisada a de Dooge (1973), onde os autores buscaram confrontar as informações disponíveis sobre a origem das equações e limitações teóricas, com o desempenho obtido em aplicações nas bacias supracitadas com dados observados. Ambos os autores constataram um mal desempenho para a equação, visto que os erros obtidos foram altos comparado às outras equações analisadas (ex: Kirpich, Corps Engineers e Ven te Chow).

Em um estudo realizado por Razmkhah (2015) em uma sub-bacia da bacia Karoon, que está localizado no sudoeste do Irã, o autor avaliou a incerteza de três parâmetros de entrada utilizados no modelo HEC-HMS, com intuito de verificar se o modelo possui capacidade de descrever, com a maior precisão possível, o mundo real, sendo estes: a) condutividade hidráulica saturada (K_s); b) coeficiente de armazenamento de Clark (R); e c) tempo de concentração (t_c). Para a determinação dos parâmetros t_c e R , foi aplicado a formulação da proposta P1. Os resultados mostraram que para os três parâmetros, a subestimação foi maior do que a superestimativa dos valores das vazões, resultado diferente do observado neste estudo, sendo que empregando P1, os hidrogramas simulados foram os que ficaram mais próximos do observado, elucidando que a precisão dos parâmetros podem divergir de uma bacia para outra.

De acordo com o estudo realizado por Steinmetz (2017), a simulação de hidrogramas, para a BHAC, aplicando o modelo geomorfológico de Clark ($HUIC_{GEO}$) por meio da modelagem semi-distribuída, apresentou valores superestimados de vazão, quando calculados os parâmetros t_c e R pelas equações

de Dooge (1973) e Mohave County (2009), respectivamente. Aplicando as mesmas formulações e o mesmo modelo de forma concentrada, Beskow *et al.* (2018), também encontraram valores superestimados de vazões para a bacia do arroio Cadeia, entretanto, os autores encontraram valores subestimados quando aplicado tais métodos na bacia do ribeirão Jaguará. Veber (2016), levando em consideração a mesma metodologia adotada por Beskow *et al.* (2018), encontrou valores superestimados e subestimados de vazões de pico para a bacia do ribeirão Lavrinha e bacia sanga Ellert, respectivamente.

Vale ressaltar, que as bacias do arroio Cadeia e da sanga Ellert estão localizadas no sul do estado do Rio Grande do Sul, já a bacia do ribeirão Lavrinha e a bacia do ribeirão Jaguará na região sudeste de Minas Gerais. Rousseau *et al.* (2012), relatam que a sensibilidade do modelo aos parâmetros é diferente de uma bacia para outra não apenas pela localização das mesmas, mas também pelas características fisiográficas da bacia, bem como na duração e distribuição da chuva.

Partindo deste pressuposto, a bacia estudada por Razmkhah (2015), citada anteriormente, possui uma área de aproximadamente 24.200km² com altitudes que variam de 700 à 4.409m. Em contra-partida, a bacia em estudo no presente trabalho possui uma área de 121,3km² com altitudes que variam de 40 à 363m. Sendo assim, os resultados obtidos, empregando a P1, para obtenção dos parâmetros, podem ter sofrido grande influência devido a esta grande diferença de área e variação de altitudes entre as bacias.

Já a bacia do ribeirão Lavrinha, ribeirão Jaguará e da sanga Ellert possuem áreas de 6,7km², 29,5km² e 0,7km², respectivamente, ou seja, são bacias com áreas inferiores comparadas à BHAC. Quando analisada a variação de altitude e a predominância de declividade presente nas bacias, constata-se que a BHAC, a bacia sanga Ellert e a bacia do ribeirão Jaguará possuem relevo com predominância ondulada, já a bacia do ribeirão Lavrinha possui relevo montanhoso, e que a variação de altitude é de 363m (BHAC), 140m (sanga Ellert), 138m (ribeirão Jaguará) e 595m (ribeirão Lavrinha). Constata-se que mesmo o relevo possuindo as mesmas características entre as bacias do arroio Cadeia e ribeirão Jaguará, as demais características fisiográficas influenciam no resultado final das simulações dos hidrogramas, afirmando a colocação de Rousseau *et al.* (2012).

4.4 Desempenho do modelo frente à estimativa de hidrogramas de ESD em relação às propostas geomorfológicas

Os hidrogramas estimados pelo modelo modificado de Clark (ModClark), da BHAC como um todo e de cada seção transversal levantada, bem como o respectivo hidrograma observado, para cada evento, estão apresentados nas figuras do Apêndice A.

Observando os gráficos nas figuras é possível constatar que dentre as quatro propostas empregadas, a P1 foi a que se sobressaiu em relação às outras, apresentando a melhor estimativa de hidrogramas para a maioria dos eventos em ambas as modelagens, seguida da P2. As propostas P3 e P4 obtiveram as piores estimativas de hidrogramas para ambas as modelagens e para a maioria dos eventos, superestimando e subestimando, respectivamente, os valores de vazão de pico.

Na Tabela 17 é possível analisar os resultados do desempenho do modelo avaliado por meio das estatísticas citadas na seção 3.8, considerando a modelagem concentrada e as quatro propostas geomorfológicas.

Tabela 17 - Valores das estatísticas de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), erro da vazão de pico (ER_{Qp}) e erro do tempo de pico (ER_{tp}) para o modelo modificado de Clark (ModClark) analisado neste estudo, considerando a modelagem concentrada

Evento	Proposta	C_{NS}	ER_{Qp} (%)	ER_{tp} (%)
Evento 1	P1	0,40	0,99	75,00
	P2	-0,05	30,87	118,75
	P3	0,81	20,33	12,50
	P4	-0,73	39,34	193,75
Evento 2	P1	0,30	0,17	42,86
	P2	-0,23	37,97	52,38
	P3	0,04	84,97	4,76
	P4	-0,97	51,30	133,33
Evento 3	P1	0,46	4,64	90,00
	P2	-0,16	46,11	110,00
	P3	-0,22	81,75	0,00
	P4	-0,80	59,23	280,00
Evento 4	P1	0,60	6,26	54,55
	P2	-0,06	48,41	63,64
	P3	-1,23	97,63	27,27
	P4	-0,94	59,17	227,27
Evento 5	P1	0,56	17,09	80,00
	P2	-0,01	54,28	90,00
	P3	-0,40	63,34	20,00
	P4	-0,72	63,69	270,00
Evento 6	P1	-0,02	25,85	90,00
	P2	-0,15	28,06	120,00
	P3	-0,87	118,77	0,00
	P4	-0,98	43,93	280,00
Evento 7	P1	-0,28	48,61	325,00
	P2	-0,38	71,80	350,00
	P3	0,59	5,73	100,00
	P4	-0,51	78,76	800,00
Evento 8	P1	0,57	21,39	29,41
	P2	0,39	29,74	52,94
	P3	-0,82	101,21	17,65
	P4	-0,50	45,04	147,06

Analisando os valores de C_{NS} , percebe-se que 4 dos 8 eventos em análise resultaram em valores enquadrados como “bom” empregando a proposta geomorfológica P1, sendo estes o evento 4, 5, 7 e 8, e um valor enquadrado como “muito bom” empregando a P3 para o evento 1. Para os outros eventos e para as outras propostas, os resultados foram classificados como “insatisfatórios” (MORIASI *et al.*, 2007).

Com base nos valores obtidos para o ER_{Qp} , a proposta que gerou os melhores resultados foi a P1, se enquadrando como “muito bom” para os eventos 1, 2, 3 e 4 e como “satisfatório” para os eventos 5 e 8, exceto para o evento 7 que

obteve o melhor resultado classificado como “muito bom” empregando a P3. Os valores de ER_{Qp} para o evento 6 e para as demais propostas foram classificados como “inadequados” (VAN LIEW *et al.* 2007). Em relação aos valores de ER_{tp} a P3 foi a que obteve o menor valor para todos os eventos, seguido pela P1, P2 e P4. Sendo assim, os piores resultados foi obtido pela P4.

Para facilitar a confrontação do desempenho entre as diferentes propostas geomorfológicas considerando o cenário 1, foram calculados os valores máximos, mínimos e médios das estatísticas referente aos 8 eventos analisados fixando as propostas geomorfológicas. A Tabela 18 expõe estes resultados.

Tabela 18 - Valores máximos, mínimos e médios das estatísticas considerando a modelagem concentrada e as propostas geomorfológicas empregadas neste estudo, com base em 8 eventos chuva-vazão

Pro-posta	C _{NS}			ER _{Qp} (%)			ER _{tp} (%)		
	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd
P1	0,60	-0,28	0,32	48,61	0,17	15,63	325,00	29,41	98,35
P2	0,39	-0,38	-0,08	71,80	28,06	43,41	350,00	52,38	119,71
P3	0,81	-1,23	-0,42	118,77	5,73	79,06	100,00	0,00	24,24
P4	-0,50	-0,98	-0,77	78,76	39,34	55,06	800,00	133,33	291,43

Analisando a Tabela 18, pode-se verificar que, em relação aos valores de C_{NS}, os melhores desempenhos foram para P3 e P1, visto que estes apresentaram eventos com maiores valores se enquadrando na classificação de Moriasi *et al.* (2007) de “muito bom” com C_{NS} maior que 0,65 para a P3 e “bom” com C_{NS} entre 0,54 e 0,65 para P1. Esses valores expressam a eficiência da aplicação do modelo para estimativas das vazões de cheias.

Em relação à ER_{Qp} , a P1 foi a que produziu o melhor desempenho, seguida da P2, com classificações de “muito bom” e “bom” para a P1 e “bom” para a P2. Os desempenhos relacionados ao tempo de pico (ER_{tp}) foram melhores para a proposta P3, visto, conforme mencionado anteriormente, que quanto mais próximo de zero, mais próximo o tempo de pico do hidrograma simulado é do hidrograma observado. A proposta P1 também gerou valores satisfatórios.

Ressalta-se que, os resultados obtidos pelos parâmetros estatísticos ER_{Qp} demonstram a relação da vazão de pico entre os hidrogramas simulados e observados, ou seja, o quanto a vazão de pico do hidrograma simulado se aproxima da vazão de pico do hidrograma observado, fato este de extrema importância para o presente estudo, visto que um dos objetivos do mesmo é a

estimativa das vazões de pico nas seções transversais levantadas ao longo da BHAC para a simulação das cotas de cheias ao longo do curso d'água principal. Partindo deste pressuposto, a P1 foi a proposta geomorfológica que resultou no melhor desempenho, pois os melhores resultados das estatísticas, em geral, foi para a mesma.

Nas Tabelas 19-23 estão dispostas os valores das estatísticas referentes à modelagem semi-distribuída, para cada conjunto de simulação, considerando as propostas geomorfológicas empregadas neste estudo em relação a cada evento.

Tabela 19 - Valores das estatísticas de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), erro da vazão de pico (ER_{Qp}) e erro do tempo de pico (ER_{tp}) para o modelo modificado de Clark (ModClark) analisado neste estudo, considerando a modelagem semi-distribuída para a S1 e S2

Evento	Proposta	C_{NS}	ER_{Qp} (%)	ER_{tp} (%)
Evento 1	P1	0,62	7,56	56,25
	P2	0,32	19,96	93,75
	P3	0,78	31,25	6,25
	P4	-0,56	33,41	168,75
Evento 2	P1	0,65	0,93	38,10
	P2	0,29	32,73	38,10
	P3	0,13	73,92	0,00
	P4	-0,99	47,34	123,81
Evento 3	P1	0,77	22,86	80,00
	P2	0,56	39,41	70,00
	P3	-0,59	85,50	10,00
	P4	-0,65	60,60	250,00
Evento 4	P1	0,53	33,95	45,45
	P2	0,25	56,62	36,36
	P3	-1,95	80,51	36,36
	P4	-0,58	69,13	250,00
Evento 5	P1	0,67	36,85	60,00
	P2	0,40	49,40	60,00
	P3	-0,86	58,90	20,00
	P4	-0,56	80,75	240,00
Evento 6	P1	0,47	24,37	70,00
	P2	-0,47	19,67	80,00
	P3	-1,13	128,29	10,00
	P4	-0,69	44,02	250,00
Evento 7	P1	0,76	36,53	25,00
	P2	0,36	62,86	50,00
	P3	0,84	37,00	25,00
	P4	-0,39	74,76	350,00
Evento 8	P1	0,83	1,05	17,65
	P2	0,92	30,52	11,76
	P3	-2,04	92,77	17,65
	P4	0,13	51,53	52,94

Tabela 20 - Valores das estatísticas de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), erro da vazão de pico (ER_{Qp}) e erro do tempo de pico (ER_{tp}) para o modelo modificado de Clark (ModClark) analisado neste estudo, considerando a modelagem semi-distribuída para a S3 e S4

Evento	Proposta	C_{NS}	ER_{Qp} (%)	ER_{tp} (%)
Evento 1	P1	0,83	11,83	18,75
	P2	0,64	15,26	93,75
	P3	0,82	29,49	6,25
	P4	-0,11	21,06	131,25
Evento 2	P1	0,71	39,35	4,76
	P2	0,88	13,87	0,00
	P3	-0,32	86,89	9,52
	P4	-0,17	37,19	38,10
Evento 3	P1	0,85	5,49	0,00
	P2	0,69	40,69	30,00
	P3	-0,27	56,86	20,00
	P4	-0,31	60,13	180,00
Evento 4	P1	0,24	27,72	45,45
	P2	0,79	29,58	0,00
	P3	-2,98	123,89	54,55
	P4	-0,10	52,80	72,73
Evento 5	P1	0,30	22,26	30,00
	P2	0,76	31,77	30,00
	P3	-2,09	95,42	50,00
	P4	0,10	54,32	70,00
Evento 6	P1	-18,37	351,10	33,33
	P2	-5,28	161,73	22,22
	P3	-35,64	522,08	50,00
	P4	-3,78	88,25	55,56
Evento 7	P1	0,78	0,02	50,00
	P2	0,54	45,46	50,00
	P3	0,58	67,37	25,00
	P4	-0,39	64,83	300,00
Evento 8	P1	0,12	57,21	11,76
	P2	0,95	4,12	5,88
	P3	-1,53	97,32	17,65
	P4	0,53	27,56	41,18

Tabela 21 - Valores das estatísticas de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), erro da vazão de pico (ER_{Qp}) e erro do tempo de pico (ER_{tp}) para o modelo modificado de Clark (ModClark) analisado neste estudo, considerando a modelagem semi-distribuída para a S5 e S6

Evento	Proposta	C_{NS}	ER_{Qp} (%)	ER_{tp} (%)
Evento 1	P1	0,87	3,23	12,50
	P2	0,64	22,08	93,75
	P3	0,85	19,38	0,00
	P4	0,01	25,60	125,00
Evento 2	P1	0,64	8,64	23,81
	P2	0,30	39,65	19,05
	P3	0,31	49,25	0,00
	P4	-0,51	58,58	90,48
Evento 3	P1	0,80	13,60	10,00
	P2	0,61	44,77	30,00
	P3	-0,17	43,72	20,00
	P4	-0,23	60,95	90,00
Evento 4	P1	0,18	31,11	45,45
	P2	0,77	31,68	9,09
	P3	-2,85	121,57	45,45
	P4	0,02	47,29	54,55
Evento 5	P1	0,48	40,11	30,00
	P2	0,32	65,54	10,00
	P3	-0,33	4,51	40,00
	P4	-0,18	74,39	80,00
Evento 6	P1	0,71	25,62	10,00
	P2	0,79	17,62	30,00
	P3	-0,38	83,62	10,00
	P4	0,08	36,34	100,00
Evento 7	P1	0,84	2,64	50,00
	P2	0,42	49,40	75,00
	P3	0,58	66,39	25,00
	P4	-0,40	58,96	300,00
Evento 8	P1	0,21	23,61	11,76
	P2	0,88	17,12	5,88
	P3	-2,12	46,22	41,18
	P4	0,69	29,11	35,29

Tabela 22 - Valores das estatísticas de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), erro da vazão de pico (ER_{Qp}) e erro do tempo de pico (ER_{tp}) para o modelo modificado de Clark (ModClark) analisado neste estudo, considerando a modelagem semi-distribuída para a S7 e S8

Evento	Proposta	C_{NS}	ER_{Qp} (%)	ER_{tp} (%)
Evento 1	P1	0,81	12,42	18,75
	P2	0,60	14,74	100,00
	P3	0,79	31,42	6,25
	P4	-0,14	20,13	125,00
Evento 2	P1	0,78	25,15	4,76
	P2	0,74	15,87	14,29
	P3	-0,12	71,41	4,76
	P4	-0,30	38,03	66,67
Evento 3	P1	0,84	19,09	10,00
	P2	0,78	28,02	20,00
	P3	-1,15	89,21	20,00
	P4	-0,35	49,13	140,00
Evento 4	P1	0,44	33,03	18,18
	P2	0,80	22,24	9,09
	P3	-3,59	143,12	45,45
	P4	0,15	59,76	109,09
Evento 5	P1	0,67	15,94	10,00
	P2	0,81	32,78	0,00
	P3	-2,50	110,39	40,00
	P4	0,30	64,08	10,00
Evento 6	P1	-0,07	85,11	10,00
	P2	0,70	12,92	30,00
	P3	-3,16	156,00	30,00
	P4	0,32	36,93	60,00
Evento 7	P1	0,46	23,32	100,00
	P2	0,14	57,37	150,00
	P3	0,65	54,03	25,00
	P4	-0,09	74,76	175,00
Evento 8	P1	0,90	2,43	11,76
	P2	0,46	53,25	0,00
	P3	-1,02	2,99	17,65
	P4	0,33	26,37	58,82

Tabela 23 - Valores das estatísticas de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), erro da vazão de pico (ER_{Qp}) e erro do tempo de pico (ER_{tp}) para o modelo modificado de Clark (ModClark) analisado neste estudo, considerando a modelagem semi-distribuída para a S9 e S10

Evento	Proposta	C_{NS}	ER_{Qp} (%)	ER_{tp} (%)
Evento 1	P1	0,80	4,87	18,75
	P2	0,59	13,35	100,00
	P3	0,77	30,38	0,00
	P4	-0,06	18,57	125,00
Evento 2	P1	0,77	28,72	4,76
	P2	0,63	23,80	9,52
	P3	-0,05	86,18	4,76
	P4	-0,28	38,13	61,90
Evento 3	P1	0,88	26,06	10,00
	P2	0,75	28,76	20,00
	P3	-1,48	92,01	20,00
	P4	-0,36	44,08	130,00
Evento 4	P1	0,70	23,14	9,09
	P2	0,76	28,21	0,00
	P3	-3,82	161,50	45,45
	P4	-0,27	45,75	90,91
Evento 5	P1	0,88	2,75	0,00
	P2	0,72	41,61	10,00
	P3	-1,90	94,42	40,00
	P4	-0,16	54,83	120,00
Evento 6	P1	0,61	27,72	20,00
	P2	0,59	25,92	30,00
	P3	-0,47	71,90	20,00
	P4	-0,22	40,12	140,00
Evento 7	P1	0,16	33,34	150,00
	P2	-0,02	60,44	175,00
	P3	0,70	41,24	50,00
	P4	-0,49	70,91	450,00
Evento 8	P1	-8,53	253,70	35,29
	P2	-1,71	109,12	35,29
	P3	-44,18	681,76	64,71
	P4	-0,42	52,16	29,41

A partir dos valores de C_{NS} , é possível analisar se o comportamento do hidrograma simulado possui a mesma predisposição do comportamento do hidrograma observado. Com os resultados obtidos, constata-se que, para a maioria dos eventos e dos conjuntos de simulação, os melhores valores obtidos com base nessa estatística foram as simulações que empregaram a proposta geomorfológica P1, seguida da P2, onde os mesmos se enquadram entre as classificações “muito

bom”, “bom” e “satisfatório” (MORIASI *et al.*, 2007). Por outro lado as piores classificações foram para a P4.

Analisando os valores resultantes da estatística ER_{Qp} , percebe-se, que o desempenho da mesma foi similar à análise dos valores de C_{NS} , onde as melhores classificações foram para a P1 seguida da P2 com classificações entre “muito bom”, “bom” e “satisfatório” para a maioria dos eventos e dos conjuntos de simulação (VAN LIEW *et al.* 2007). Em relação aos valores de ER_{tp} de cada conjunto de simulação, constata-se que os menores valores obtidos foram pelas propostas P1, P2 e P3, para os 8 eventos utilizados no estudo, sendo que estes variaram consideravelmente entre as 3 propostas. Já os resultados obtidos pela P4 foram os maiores valores apresentados de ER_{tp} .

Conforme realizado no cenário 1, para facilitar a confrontação do desempenho entre as propostas geomorfológicas empregadas no cenário 2, também foram calculados os valores máximos, mínimos e médios das estatísticas referente aos 8 eventos analisados fixando as propostas geomorfológicas. Na Tabela 24 pode-se observar os resultados.

Tabela 24- Valores máximos, mínimos e médios das estatísticas considerando a modelagem distribuída e as propostas geomorfológicas empregadas neste estudo, com base em 08 eventos chuva-vazão

Seção/Proposta		CNS			ER _{Qp} (%)			ER _{tp} (%)		
		Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd
Seção 1	P1	0,83	0,47	0,66	36,85	0,93	20,51	80,00	17,65	49,06
	P2	0,92	0,25	0,45	62,85	19,67	38,90	93,75	11,76	55,00
	P3	0,84	-2,04	-0,80	128,29	31,25	79,56	36,36	0,00	17,00
	P4	0,13	-0,99	-0,54	80,75	33,41	57,69	350,00	52,94	204,44
Seção 2	P1	0,85	-18,37	-1,82	351,10	0,02	64,37	50,00	0,00	24,26
	P2	0,95	-5,28	0,00	161,73	4,12	42,81	93,75	0,00	28,98
	P3	0,82	-35,64	-6,04	522,08	29,49	149,98	54,55	6,25	32,39
	P4	0,53	-3,78	-0,53	88,25	21,06	50,77	300,00	38,10	111,10
Seção 3	P1	0,87	0,18	0,59	40,11	2,64	18,57	50,00	10,00	24,19
	P2	0,88	0,30	0,59	65,54	17,12	35,98	93,75	5,88	34,10
	P3	0,85	-2,85	-0,71	121,57	4,51	59,33	45,45	0,00	25,95
	P4	0,69	-0,51	-0,07	74,39	25,60	48,90	300,00	35,29	109,41
Seção 4	P1	0,90	-0,07	0,60	85,11	2,43	27,06	100,00	4,76	22,93
	P2	0,81	0,14	0,63	57,37	12,92	29,65	150,00	0,00	40,42
	P3	0,79	-3,59	-1,56	156,00	2,99	89,59	45,45	4,76	26,12
	P4	0,33	-0,35	0,03	74,76	30,13	46,15	175,00	10,00	93,07
Seção 5	P1	0,88	-8,53	0,47	253,70	2,75	50,04	150,00	0,00	30,99
	P2	0,76	-1,71	0,29	109,12	13,35	41,40	175,00	0,00	47,48
	P3	0,77	-44,18	-7,32	681,76	30,38	175,57	64,71	0,00	34,99
	P4	-0,06	-0,49	-0,28	70,91	18,57	45,57	450,00	29,41	143,40

Analisando os valores máximos do C_{NS} percebe-se que para maioria das seções as quatro propostas geomorfológicas apresentaram um excelente desempenho quando analisado os eventos que resultaram os maiores C_{NS} 's, demonstrando que os hidrogramas simulados possuem um bom ajuste em relação aos hidrogramas observados, visto que a classificação para este coeficiente, em geral, foi como "muito bom". Ainda analisando os valores de C_{NS} , alguns valores médios se enquadraram na classificação "bom", para as propostas P1 e P2. Para as estatísticas da ER_{tp} , as propostas P1, P2 e P3 apresentaram bons desempenhos, com valores próximos ou iguais a zeros, evidenciando que os tempos de pico dos hidrogramas simulados ficaram próximos dos hidrogramas observados.

Em relação às vazões de pico, como constatado nas estatísticas do desempenho da modelagem concentrada, a P1 também foi a que propiciou melhor ajuste, com classificações de "muito bom" para todas as seções, seguida da proposta P2 para as seções 2, 3 e 4. Sendo assim, a P1 foi a proposta geomorfológica que apresentou o melhor desempenho, do mesmo modo como ocorreu no cenário 1. A P2 também culminou em um bom desempenho comparativamente às propostas P3 e P4, visto que a P4 foi a que produziu o pior desempenho.

Analisando as estatísticas referente às modelagens dos hidrogramas para os dois cenários, constatou-se que a modelagem semi-distribuída por sub-bacias apresentou desempenho ligeiramente superior em relação a modelagem concentrada. Os modelos concentrados geralmente requerem menos parâmetros de entrada no software do que os modelos semi-distribuídos. Contudo, segundo Yu e Jeng (1997), o modelo semi-distribuído apresenta melhor desempenho na simulação de hidrogramas de cheias em bacias hidrográficas caracterizadas pela heterogeneidade da distribuição das chuvas. Partindo deste pressuposto, muitos estudos estão sendo realizados a fim de verificar o desempenho de modelos hidrológicos concentrados, semi-distribuídos e distribuídos, como por exemplo o estudo realizado por Eid, Campana e Costa (2003) e Caldeira *et al.* (2019).

No estudo realizado por Eid, Campana e Costa (2003), os autores avaliaram o impacto da discretização espacial da bacia do rio Corumbá no software HEC-HMS aplicando o modelo do HU de Snyder. O processo de discretização da bacia ocorreu em três configurações espaciais: 23 sub-bacias, 8 sub-bacias e uma única

bacia. Eles perceberam que ao elevar a discretização espacial, o modelo produziu valores mais altos de vazão de pico e tempos de pico menores, porém, a variação da discretização espacial não produziu modificações consideráveis nos resultados do mesmo. Entretanto, à medida que a discretização espacial reduzia de 23 sub-bacias hidrográficas para uma única bacia hidrográfica houve uma perda de detalhes nos hidrogramas, como pequenas variações de descargas calculadas nas fases de ascensão e recessão dos mesmos.

Já no estudo de Caldeira *et al.* (2019), foi verificada a eficiência do modelo LASH de forma semi-distribuída e distribuída, comparando os hidrogramas simulados com os observados da bacia do rio Fragata (FRB), localizada no sul do estado do Rio Grande do Sul, perto da região da bacia em estudo neste trabalho. Os resultados indicaram que houve efeito da discretização espacial na quantificação de processos hidrológicos na bacia analisada, além disso concluiu-se que a discretização em módulos (distribuído) superou a discretização por sub-bacias (semi-distribuído), embora este último também tenha fornecido resultados satisfatórios. Compete destacar que no presente estudo ambas as modelagens concentradas e semi-distribuídas foram realizadas levando em consideração a discretização em módulos por meio do HUI modificado de Clark.

Fazendo uma análise entre as características das bacias estudadas pelos autores das propostas em relação àquelas da bacia e as sub-bacias delimitadas do arroio Cadeia, foi possível constatar semelhanças referentes ao relevo do curso d'água das bacias utilizadas para a formulação da P1 (STRAUB; MELCHING; KOCHER, 2000) com as bacias em estudo, com variações de $0,60$ à $10,61\text{m}\cdot\text{km}^{-1}$ para as bacias analisadas pelos autores e $2,30$ à $11,74\text{m}\cdot\text{km}^{-1}$ para a bacia e sub-bacias do arroio Cadeia, ao contrário da variação de declividade encontrada para os cursos d'água analisados no estudo de Mohave County (2009) ($32,64$ à $87,48\text{m}/\text{km}$), utilizadas para formulação da proposta P4, as quais foram bem superiores a da bacia e das sub-bacias em estudo. Ambos os estudos das propostas P1 e P4 analisaram bacias com áreas menores que a bacia e as sub-bacias do presente estudo ($0,06$ à $5,96\text{km}^2$ para a P1; $3,8$ à $35,102\text{km}^2$ para a P4; $20,6$ à $110,6\text{km}^2$ para as sub-bacias do arroio Cadeia; e $121,3\text{km}^2$ para a BHAC), entretanto na formulação da P1 o parâmetro área não é considerado.

Em relação às outras características morfométricas utilizadas nas formulações das propostas P1 e P4, constatou-se que a variação do comprimento

do rio para a bacia como um todo e as sub-bacias delimitadas ao longo da BHAC foram superiores (4,69km à 23,20km) aos comprimentos das bacias estudadas por Straub, Melching e Kocher (2000) (0,21 à 10,31km) e por Mohave County (2009) (1,94 à 6,85km). Os valores da variação do comprimento medido ao longo do comprimento do curso d'água principal perpendicular ao centróide da bacia hidrográfica (L_{ca}), foram consideravelmente maiores para as sub-bacias do arroio Cadeia (4,36 à 15,20km) em comparação aos das bacias estudadas por Mohave County (2009) (1,92 à 6,54km). Esse fato ocorre devido ao comprimento dos cursos d'água das sub-bacias do arroio Cadeia serem maiores que as bacias analisadas pelo autor.

Os parâmetros das proposta P2, formulada por Osman e Abustan (2012), são calculados levando em consideração três coeficientes relacionados às características fisiográficas da bacia, sendo estas, a área, declividade e comprimento do curso d'água, os quais variam entre 130 à 1500km², 6,72 à 45,77 m·km⁻¹ e 41,00 à 75,14km, respectivamente, valores estes mais elevados do que os encontrados para a bacia e sub-bacias em estudo.

Para a proposta P3 (DOOGE, 1973) apenas a área e a declividade média da bacia são considerados em sua formulação, com valores que variaram de 145 à 948km² e 42 à 655 partes por 10.000, respectivamente. Salienta-se, que esta proposta foi elaborada visando bacias com áreas superiores à da bacia e sub-bacias em estudo, e que a declividade média das sub-bacias, bem como da bacia como um todo do arroio Cadeia, são superiores em relação as respectivas características das bacias utilizadas para as formulações de Dooge (1973), variando de 1584 à 2230 partes por 10.000.

Corroborando ao exposto, constata-se que a declividade do curso d'água possuiu grande influência em relação à determinação dos parâmetros das propostas geomorfológicas, e por consequência na simulação dos hidrogramas. Entretanto, destaca-se que os resultados podem variar de acordo com as características de cada bacia, como pôde ser evidenciado na análise realizada neste estudo.

4.5 Modelagem hidráulica

Primeiramente, para a realização da simulação hidráulica, foi necessário inserir os dados do levantamento das 6 seções transversais no software HEC-RAS. Além dos dados das seções transversais, também foi necessário informar os dados do coeficiente de rugosidade, o qual foi obtido levando em consideração parâmetros geométricos da seção, bem como as vazões de cada uma em questão e informações do relevo. Na Tabela 25, Figura 32 e Figuras 33-38 estão dispostos os valores do coeficiente de rugosidade de Manning juntamente com os dados dos parâmetros para a aquisição dos mesmos, a localização dos trechos entre as seções e as fotos das seções transversais levantadas ao longo da BHAC, respectivamente.

Tabela 25 - Valores do coeficiente de rugosidade (n), vazão (Q), área da seção transversal (A), raio hidráulico (R_h) e declividade da linha de energia (\bar{S}_f)

Trechos	Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	A (km^2)	R_h (m)	\bar{S}_f ($m \cdot m^{-1}$)	n ($s \cdot m^{-1/3}$)
1-2	2,012	3,668	0,225	0,004	0,043
2-3	1,788	3,756	0,243	0,009	0,080
3-4	1,775	3,096	0,221	0,004	0,041
4-5	1,314	2,985	0,328	0,004	0,067
5-6	1,256	3,909	0,387	0,005	0,117

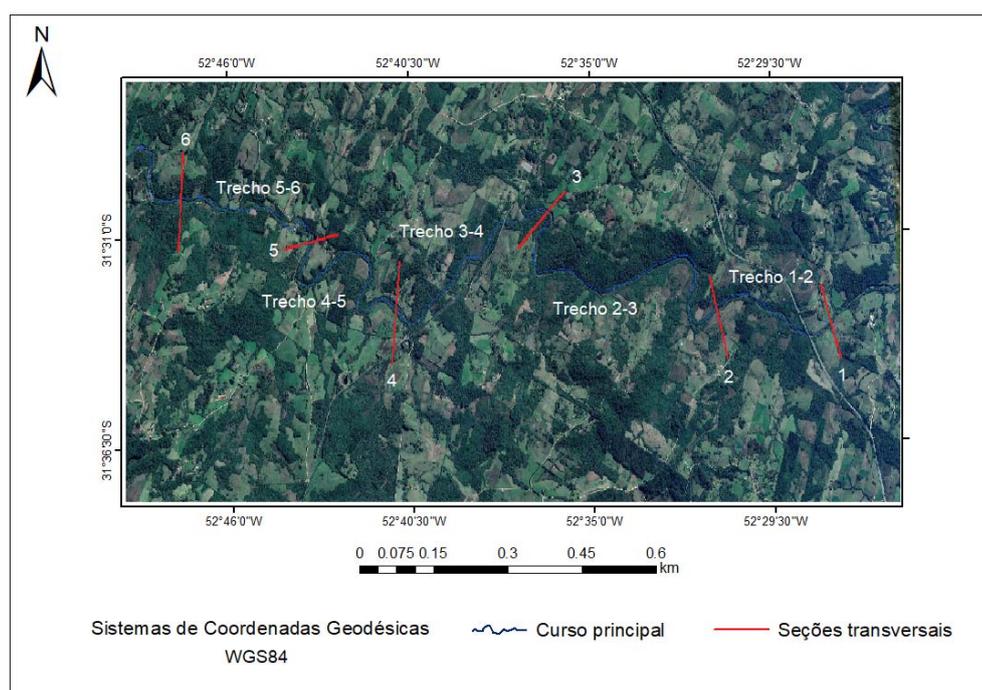


Figura 32 – Localização dos trechos entre as seções transversais.



Figura 33 - Ilustração da seção transversal 1 (seção de controle da BHAC).



Figura 34- Ilustração da seção transversal 2.



Figura 35- Ilustração da seção transversal 3.



Figura 36- Ilustração da seção transversal 4.

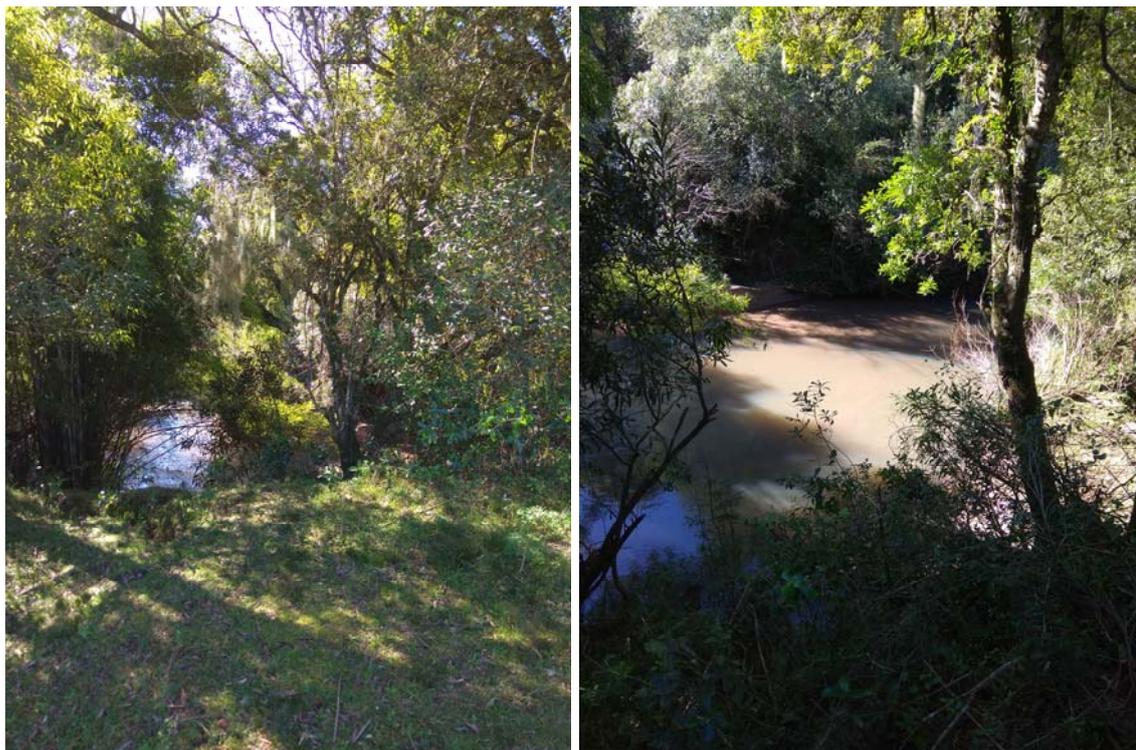


Figura 37- Ilustração da seção transversal 5.

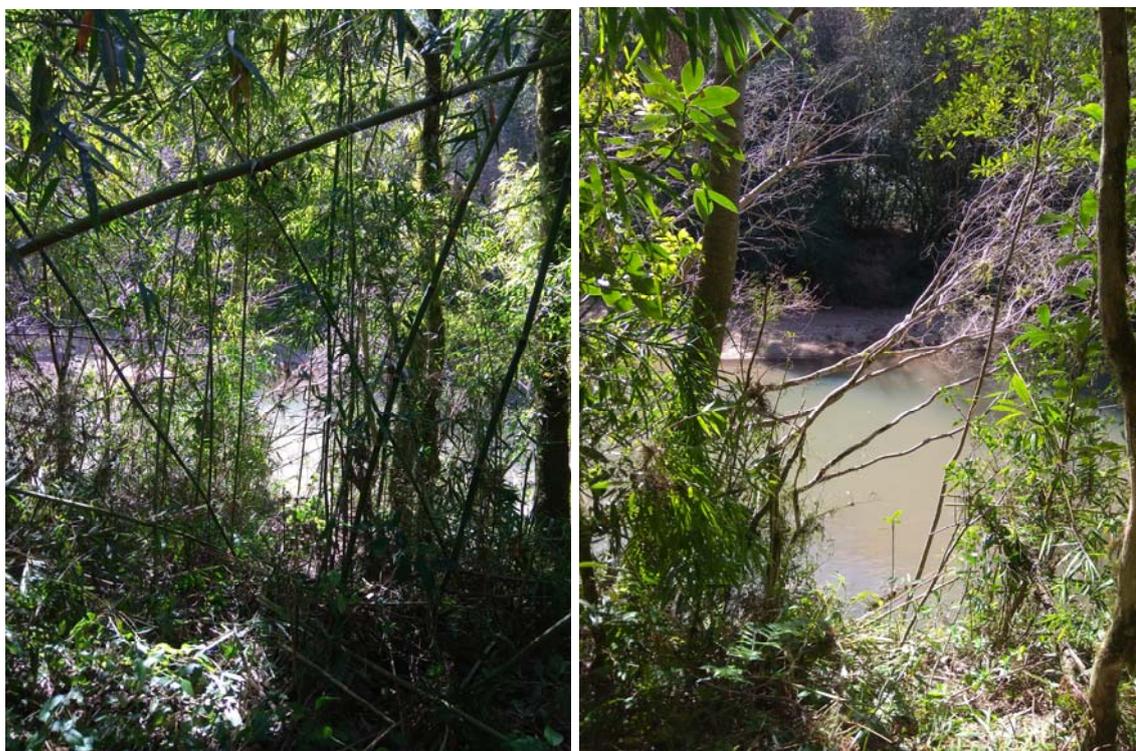


Figura 38- Ilustração da seção transversal 6.

A adoção de um coeficiente de rugosidade adequado é um processo desafiador, pois envolve experiências práticas além de julgamentos individuais e locais, o que poderia resultar na obtenção de valores diferentes na análise do

mesmo canal (ZINK; JENNINGS, 2014; AYVAZ, 2013). Isso acontece devido ao fato de que o coeficiente de rugosidade tem seu valor influenciado por inúmeros fatores, tais como a rugosidade da superfície, irregularidades e alinhamento do canal, efeitos da vegetação, mudanças na geomorfologia do leito do canal e variação dos níveis d'água (CHOW, 1959).

Diante da importância e dificuldade na determinação do coeficiente de rugosidade, vários autores apresentaram equações para quantificar esse valor, equações estas que são apresentadas na literatura especializada. Prajapati, Vadher e Yadav (2016) encontraram coeficientes de rugosidade usando a Equação de Manning, as relações empíricas de Limerinous, Strickler, Meyer-Peter e Muller e da tabela Cowan em um estudo realizado no rio Purna localizado na Índia Ocidental. Os autores compararam os resultados obtidos com os valores observados pela estação de Garudeshwar, também localizada no rio Purna, e concluíram que o coeficiente de rugosidade calculado pela equação de Manning foi o mais próximo ao observado.

Na literatura é possível encontrar diversas tabelas com valores do coeficiente de rugosidade obtidos por meio de ensaios e medições em campo. Sendo assim, fez-se uma comparação dos resultados calculados do coeficiente de Manning com os valores tabelados apresentados na obra "Hidráulica Básica", de Porto (2006), conforme a tabela adaptada a seguir.

Tabela 26 - Valores tabelados do coeficiente de Manning

Arroios e rios	Condições			
	Muito Boas	Boas	Regulares	Más
1. Limpos, retilíneos e uniformes	0,025	0,028	0,030	0,033
2. Como em 1, porém com vegetação e pedras	0,030	0,033	0,035	0,040
3. Com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos	0,035	0,040	0,045	0,050
4. Como em 3, águas baixas, declividade fraca	0,040	0,045	0,050	0,055
5. Como em 3, com vegetação e pedras	0,033	0,035	0,040	0,045
6. Como em 4, com pedras	0,045	0,050	0,055	0,060
7. Com margens espraiadas, pouca vegetação	0,050	0,060	0,070	0,080
8. Com margens espraiadas, muita vegetação	0,075	0,100	0,125	0,150

Fonte: Adaptado de Porto (2006).

Analisando as figuras e os dados tabelados, pode-se perceber que os valores calculados do coeficiente de Manning estão condizentes com os valores

propostos na tabela, bem como as descrições das características das seções, com meandros, margens espraiadas, presença de vegetação e pedras.

Em um estudo realizado por Bastos (2007), para duas sub-bacias da bacia hidrográfica do Alto da Colina e uma sub-bacia do rio Vacacaí Mirim, ambas localizadas no município de Santa Maria – RS, os valores de n foram estimados por meio da calibração usando o modelo SWMM e variaram de 0,06 a 0,021. Parmigiani (2017) com auxílio de imagens de satélite e tabelas de valores de n estimou para trechos dos rios Passo Fundo e Uruguai, ambos localizados no Município de Nonoai - RS, valores do coeficiente entre 0,04 a 0,15. Já Lyra *et al.* (2010), estimaram valores de n para trechos do rio Paracatu, entre os estados de Minas Gerais, Goiás e Brasília, por meio de um modelo baseado em redes neurais artificiais e obtiveram valores entre 0,02 a 0,06. E por fim, Teixeira *et al.* (2018) utilizaram o mesmo método de obtenção do coeficiente de rugosidade apresentado no presente trabalho (Equação de Manning) para o rio Doce, localizado entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, e obtiveram valores entre 0,04 a 0,09.

Conforme mencionado, vários fatores interferem na obtenção de rugosidade de um canal, além disso a estimativa deste coeficiente tem grande influência na modelagem hidráulica. Em um estudo realizado por Friedrich e Ota (2003), foi analisado a influência do coeficiente de rugosidade do leito de um rio sobre os resultados obtidos pela modelagem computacional e verificada uma grande sensibilidade do modelo referente ao valor de entrada desse parâmetro, podendo influenciar nos valores dos níveis de água. Diante disso, ressalta-se a importância da escolha da metodologia adotada para a estimativa deste coeficiente.

Posteriormente, foi necessário informar os dados das vazões de pico de cada seção transversal obtidos por meio da simulação hidrológica, considerando as propostas empregadas neste estudo. Nas Tabelas 27-30 estão dispostos os valores das vazões de pico estimadas.

Tabela 27 - Valores das simulações das vazões máximas para cada seção transversal empregando a P1

Seção	Vazão máxima (m ³ ·s ⁻¹)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
1	51,0	17,9	32,1	11,3	13,4	27,4	19,6	13,1
2	43,7	17,2	31,4	10,2	12,4	24,6	10,6	7,9
3	37,8	15,6	25,0	9,3	6,6	20,7	7,7	6,5
4	32,8	14,8	20,7	7,4	5,7	15,8	4,1	2,5
5	28,7	11,9	14,4	6,6	4,7	11,5	2,2	2,2
6	28,4	8,9	11,0	3,5	3,8	8,7	1,4	0,2

Tabela 28 - Valores das simulações das vazões máximas para cada seção transversal empregando a P2

Seção	Vazão máxima (m ³ ·s ⁻¹)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
1	34,9	11,1	18,1	6,2	7,4	15,7	10,8	7,6
2	31,4	10,8	17,7	5,6	6,8	14,2	5,8	4,7
3	27,2	9,1	12,9	4,6	3,3	11,2	3,8	3,6
4	23,7	8,0	11,1	3,8	3,0	8,6	2,1	1,4
5	22,7	7,2	7,8	3,5	2,5	6,7	1,2	0,6
6	21,5	4,5	5,3	1,7	1,8	4,7	0,7	0,1

Tabela 29- Valores das simulações das vazões máximas para cada seção transversal empregando a P3

Seção	Vazão máxima (m ³ ·s ⁻¹)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
1	60,8	33,2	61,1	23,9	26,4	47,6	40,4	21,8
2	51,2	29,7	55,3	19,2	22,6	37,7	19,4	11,5
3	41,7	22,2	34,9	13,5	9,6	26,0	11,3	7,7
4	35,8	22,1	29,0	11,2	8,3	21,0	5,8	3,1
5	30,7	17,3	20,2	9,8	6,8	14,5	3,1	1,2
6	28,6	10,5	12,6	4,1	4,3	9,6	1,6	0,3

Tabela 30- Valores das simulações das vazões máximas para cada seção transversal empregando a P4

Seção	Vazão máxima (m ³ ·s ⁻¹)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
1	30,6	8,7	13,7	4,9	5,9	12,2	8,1	5,9
2	26,9	7,8	12,6	4,0	5,0	10,5	4,2	3,5
3	26,5	7,2	10,2	3,6	2,7	9,2	3,1	3,0
4	23,0	6,1	8,5	2,9	2,3	6,8	1,6	1,2
5	21,2	5,5	6,1	2,7	1,9	5,5	0,9	0,5
6	20,8	3,6	4,3	1,3	1,5	4,0	0,6	0,1

Como pode ser observado as maiores vazões de pico simuladas foram para o evento 1 e as menores para o evento 8, para as quatro propostas. Estas variações ocorrem devido aos dados de entrada que são informados no software

HEC-RAS, sendo esses dependentes das características da bacia assim como da distribuição e magnitude dos eventos analisados.

Recordando que a seção 1 é correspondente a seção de controle da BHAC, para fins comparativos, na Tabela 31 estão dispostas as vazões máximas observadas e as vazões máximas simuladas pelas propostas geomorfológicas na seção de controle da bacia do arroio Cadeia referente a cada evento estudado.

Tabela 31 - Valores das vazões máximas observadas e simuladas para a seção de controle da BHAC

Seção de controle	Vazão máxima (m ³ ·s ⁻¹)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
Observada	50,5	17,9	33,6	12,1	16,2	21,8	38,2	10,8
P1	51,0	17,9	32,1	11,3	13,4	27,4	19,6	13,1
P2	34,9	11,1	18,1	6,2	7,4	15,7	10,8	7,6
P3	60,8	33,2	61,1	23,9	26,4	47,6	40,4	21,8
P4	30,6	8,7	13,7	4,9	5,9	12,2	8,1	5,9

Referente aos valores simulados, apresentados na Tabela 31, averigua-se que em geral a proposta P1 foi a que obteve os valores mais próximos dos observados, exceto para o evento 7, onde a P3 obteve melhor aproximação. Conforme Beskow *et al.* (2015), Kumar *et al.* (2003) e Merz *et al.* (2010), a obtenção da vazão máxima é necessária para controlar e atenuar as cheias em uma determinada área da bacia hidrográfica, no dimensionamento de obras hidráulicas como pontes, represas, galerias, sistemas de coleta e drenagem, entre outros. A estimativa destes dados são limitantes na viabilidade econômica e segurança de projetos de estruturas hidráulicas, bem como na gestão de recursos hídricos, auxiliando na mitigação do impacto de desastres naturais e no manejo de áreas alagadas.

Segundo Watts e Haeke (2003), a crescente urbanização aumenta a impermeabilização do solo fazendo com que o escoamento superficial obtenha altas velocidades e aumento do volume e, conseqüentemente altera o ciclo hidrológico. Sendo assim, os picos de vazão ocorrem com mais frequência e em grandes magnitudes, em adição, as cheias ocorrem mais frequentemente, tornando as bacias mais sensíveis às precipitações tanto moderadas como fracas. Partindo deste pressuposto, diferentes metodologias estão sendo aplicadas na literatura visando à determinação acurada das vazões de pico e simulações de hidrogramas de cheias, como por exemplo, estudos realizados por Jabur e Rizzi (2011)

aplicando o Método Racional, Cassalho *et al.* (2017) por meio da regionalização hidrológica, e Adib *et al.* (2010) através de modelos baseados na teoria do Hidrograma Unitário (HU).

Uma informação também importante para a simulação hidráulica é o regime de escoamento do canal em estudo e para isso é aplicado a equação do número de Froude, conforme mencionado na seção 3.9.3. Para os trechos em análise da BHAC o Fr foi menor que 1, ou seja, são trechos com regime de escoamento subcrítico (regime lento), regime este característico de leitos fluviais.

Além disso, também foi necessário informar em quais condições se encontravam as seções à montante e jusante do trecho total em análise, visto que a seção à montante está localizada no início de uma cachoeira. Sendo assim, para a seção à montante a condição informada ao software foi de uma condição crítica, já para a seção a jusante de condição normal. Visto que, a profundidade normal depende da declividade do canal, foi necessário informar a declividade a jusante da seção ($0,006 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$).

Os perfis longitudinais simulados da linha d'água do trecho em análise, para as quatro propostas, podem ser analisados nas figuras do Apêndice B, bem como as respectivas simulações das cotas de cheias em cada seção transversal presentes no Apêndice C. Nas tabelas 32-35, constata-se as cotas simuladas em cada seção transversal, referente a cada evento, para as quatro propostas empregadas neste estudo.

Tabela 32 - Valores das cotas simuladas em cada seção transversal empregando a P1

Seção	Cota (m)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
1	1,7	1,1	1,4	1,3	0,9	1,3	1,1	0,9
2	1,8	1,2	1,5	0,9	1,0	1,4	1,0	0,8
3	2,6	1,9	2,2	1,6	1,5	2,1	1,5	1,4
4	1,7	1,2	1,4	1,0	0,9	1,3	0,8	0,6
5	1,6	1,1	1,2	0,8	0,7	1,0	0,5	0,5
6	2,9	1,7	1,8	1,1	1,1	1,7	0,8	0,5

Tabela 33- Valores das cotas simuladas em cada seção transversal empregando a P2

Seção	Cota (m)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
1	1,4	0,8	1,0	0,7	0,7	1,0	0,8	0,7
2	1,5	0,9	1,1	0,7	0,7	1,0	0,7	0,6
3	2,3	1,6	1,8	1,3	1,2	1,7	1,2	1,2
4	1,5	1,0	1,1	1,8	0,6	1,0	0,5	0,5
5	1,5	0,9	0,9	0,6	0,5	0,8	0,3	0,2
6	2,6	1,3	1,4	0,8	0,9	1,3	0,6	0,4

Tabela 34- Valores das cotas simuladas em cada seção transversal empregando a P3

Seção	Cota (m)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
1	1,8	1,4	1,8	1,2	1,3	1,6	1,5	1,1
2	1,8	1,4	1,9	1,2	1,3	1,6	1,2	1,0
3	2,7	2,1	2,6	1,8	1,7	2,3	1,7	1,5
4	1,8	1,4	1,6	1,1	1,0	1,4	0,9	0,7
5	1,7	1,3	1,4	1,0	0,9	1,2	0,6	0,3
6	3,0	1,8	2,0	1,2	1,2	1,7	0,8	0,5

Tabela 35- Valores das cotas simuladas em cada seção transversal empregando a P4

Seção	Cota (m)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
1	1,3	0,8	0,9	0,6	0,7	0,9	0,7	0,7
2	1,4	0,8	1,0	0,5	0,6	0,9	0,6	0,6
3	2,2	1,4	1,6	0,9	1,1	1,6	1,1	1,1
4	1,5	0,9	1,0	0,4	0,5	1,0	0,5	0,4
5	1,4	0,8	0,8	0,4	0,5	0,8	0,3	0,4
6	2,6	1,1	1,2	0,6	0,8	1,2	0,6	0,4

Analisando as propostas individualmente, constata-se que as maiores cotas simuladas são para o evento 1, já as menores para o evento 8, isso ocorre, conforme citado anteriormente, porque as maiores vazões de pico simuladas foram para o evento 1 e as menores para o evento 8. Em relação às cotas simuladas por evento, considerando as 4 propostas, os maiores níveis estimados ocorreram, em geral, na seção 3, já os menores valores na seção 1 e 2. Estas variações de cotas entre as seções são evidenciadas ao longo dos perfis longitudinais simulados, onde é possível verificar que a magnitude dos eventos também é um fator que influencia nas simulações dos níveis de água.

Referente às propostas empregadas, é possível notar a variação das cotas simuladas para um mesmo evento e para uma mesma seção, por exemplo, para a P1, que obteve o melhor desempenho, a cota da seção 1 para o evento 1 foi de 1,7m, já para as outras propostas foram 1,4m, 1,8m e 1,3m. Para o evento 2,

considerando a mesma seção, a cota estimada para P1 foi de 0,9m, já para as outras propostas foram de 0,7m, 1,1m e 0,7m. A partir dos resultados obtidos constata-se que as cotas simuladas estão fortemente ligadas às vazões de pico informadas ao software HEC-RAS, visto que, conforme maiores os valores destes dados, maiores serão as cotas de cheias simuladas nas seções, em contra-partida, quanto menores os valores informados das vazões de pico, menores serão as cotas de cheias simuladas.

Conforme Bhaskar *et al.* (1997), as formulações geomorfológicas não podem ser consideradas universais, uma vez que as equações usadas para estimar os parâmetros das formulações estão sujeitas a erros de regressão e os expoentes das variáveis geomorfológicas são dependentes dos locais para os quais foram obtidos. No presente estudo, a simulação hidrológica para a BHAC que obteve o melhor desempenho foi a que utilizou como dados de entrada os valores de t_c e R oriundos da proposta P1. Sendo assim, esta proposta seria a mais indicada para simular vazões máximas e cotas de cheias para bacias sem monitoramento que possuem características fisiográficas semelhantes a bacia em análise. Entretanto, mais estudos devem ser realizados a fim de verificar o desempenho da proposta geomorfológica P1 em relação à eventos de chuvas com diferentes características e magnitudes dos eventos analisados na referida pesquisa.

Conforme Di Baldassarre *et al.* (2010) e Vorogushyn *et al.* (2010), o aumento da preocupação em relação aos riscos de inundações levaram ao desenvolvimento de metodologias inovadoras voltados à simulação hidráulica de sistemas fluviais e de planícies de inundação. Os modelos de inundação são ferramentas úteis para a construção e análise de eventos históricos além de serem importantes no desenvolvimento de planos de gerenciamento de risco de inundações. Partindo deste pressuposto, Coutinho (2015) e Masoero *et al.* (2013) analisaram a capacidade do software HEC-RAS em relação às simulações de áreas de inundação, bem como nas simulações das cotas de cheias, nas cidades de Colatina-ES e em uma região Polonesa da Itália, respectivamente, e verificaram um ótimo desempenho do software quando comparado os resultados simulados com os observados.

Entretanto, além do bom desempenho do software, é necessário que os dados de entrada no mesmo sejam confiáveis, visto que as simulações geradas servirão de apoio para previsões e alertas de cheias, bem como nas estratégias de

mitigação de tal desastre natural. Sendo assim, recomenda-se que novos estudos sejam realizados com intuito de verificar a sensibilidade do software referente as simulações das cotas de cheias conforme as variações dos valores do coeficiente de rugosidade. Também recomenda-se que seja realizado um monitoramento das seções transversais ao longo do tempo, onde pontos georreferenciados podem ser coletados juntamente com as medições dos eventos, a fim de verificar se existe uma mudança significativa em sua topografia que possa influenciar nas simulações das cotas de cheias.

5 Conclusões

Com fundamentação nos resultados obtidos é possível constatar que:

- A hipótese do estudo, de que as diferentes formulações geomorfológicas do HUI de Clark resultam, para um mesmo evento de chuva, em hidrogramas distintos foi confirmada, bem como a hipótese de que as características fisiográficas da bacia em estudo possuem grande influência sobre as propostas geomorfológicas.
- A P1 foi a proposta que obteve o melhor desempenho em relação às simulações dos hidrogramas de ESD e na quantificação das vazões de pico para a bacia como um todo e sub-bacias delimitadas ao longo do arroio Cadeia. Já a P4 foi a proposta menos indicada para utilização na bacia e sub-bacias hidrográficas estudadas, pois não propiciou, em geral, resultados satisfatórios.
- A modelagem semi-distribuída por sub-bacias apresentou desempenho ligeiramente superior em relação a modelagem concentrada.
- A escolha de qual proposta empregar nas simulações hidrológicas têm grande impacto nos resultados obtidos nas simulações hidráulicas.
- A magnitude dos eventos de chuva-vazão, assim como as diferentes propostas geomorfológicas, implicam em diferentes valores simulados de vazões de pico as quais possuem grande influência nas simulações das cotas de cheias ao longo do curso d'água do canal da bacia em estudo.
- A simulação das cotas de cheias mostrou-se sensível referente aos dados de entrada informado ao software HEC-RAS.

6 Considerações Finais

O presente trabalho apresenta uma importância significativa no contexto da engenharia hidrológica e hidráulica, visto que os projetistas, especialmente no Brasil, têm empregado formulações empíricas e simplificadas obtidas em estudos realizados em bacias localizadas fora do país, as quais possuem características distintas entre si. Além disso, não é verificado a acurácia da aplicação destas formulações, o que pode vir a acarretar em problemas de dimensionamento hidrológico e hidráulico, bem como na gestão dos recursos hídricos.

É importante salientar, que o presente trabalho buscou avaliar propostas geomorfológicas que têm sido pouco aplicadas na literatura, pretendendo verificar o desempenho das mesmas em relação às características da bacia e sub-bacias do estudo. Nesse sentido, foi verificado que existe um grande impacto das características fisiográficas das bacias (especialmente aquelas ligadas ao relevo) sobre o desempenho das propostas.

Também foi verificado que a acurácia das estimativas das vazões de pico está fortemente ligada ao bom desempenho das propostas, podendo este fato levar ao dimensionamento errôneo de obras hidrológicas e hidráulicas conforme a escolha de qual proposta geomorfológica aplicar. Além disso, a utilização destas propostas com bom desempenho pode ser de grande valia para a composição de sistemas simplificados de previsão e alertas de enchentes, visto que a acurácia destes dados são fundamentais nas estimativas das cotas de cheias, pois podem influenciar nas simulações das mesmas ao longo do curso d'água. Porém, além dos dados de vazões de pico estimados com bom desempenho, também é necessário informar dados referente as características do leito fluvial com boas precisões, destacando então, a importância de estudos e pesquisas de diferentes metodologias que possibilitem a aquisição de tais dados de forma mais confiável possível.

Ainda que os resultados deste estudo tenham sido promissores, indica-se que estudos futuros nesta temática sejam desenvolvidos no intuito de:

- Obter equações empíricas para os parâmetros do HUIC com base em bacias distintas na região em estudo, considerando diferentes parâmetros geomorfológicos e condições fisiográficas locais.

- Realizar campanhas de campo visando diferentes medições de vazão x cota em períodos distintos (ex: secas e cheias) visando a estimativa do coeficiente de rugosidade, bem como aplicar diferentes metodologias para a estimativa de tal coeficiente a fim de verificar se há influência nas simulações das cotas de cheias e na simulação do perfil longitudinal da linha d'água ao longo do canal da BHAC.
- Realizar um monitoramento das seções transversais ao longo do tempo, com intuito de verificar se existe mudanças significativas na topografia da mesma que possa influenciar nas simulações das cotas de cheias, assim como na simulação do perfil longitudinal da linha d'água ao longo do canal da BHAC.

REFERÊNCIAS

ABUSHANDI, E.; MERKEL, B. Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. **Water Resources Management**, v. 27, n. 7, p. 2391-2409, 2013.

ADIB, A.; SALARIJAZI, M.; VAGHEFI, M.; SHOOSHTARI, M. M.; AKHONDALI, A. M. Comparison between GclUH-Clark, GIUH-Nash, Clark-IUH, and Nash-IUH models. **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, v. 34, p. 91 – 103, 2010.

AGUIRRE, U.; GOÑI, M.; L. J. J.; GIMENA, F. N. Application of a unit hydrograph based on subwatershed division and comparison with Nash's instantaneous unit hydrograph. **Catena**, v. 64, n. 2-3, p. 321-332, 2005.

AGRAWAL, A. **A Data Model with Pre and Post Processor for HEC-HMS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Texas A&M. Texas, 210p., 2005.

AHMAD, M. M.; GHUMMAN, A. R.; AHMAD, S. Estimation of Clark's Instantaneous Unit Hydrograph parameters and development of direct surface runoff hydrograph. **Water Resources Management**, v. 23, n. 12, p. 2417-2435, 2009.

AJMAL, M.; WASEEM, M.; AHN, J. H.; KIM, T. W. Improved runoff estimation using event-based rainfall-runoff models. **Water Resources Management**, v. 29, n. 6, p. 1995-2010, 2015.

ALTAF, F.; MERAJ, G.; ROMSHOO, S. A. Morphometric Analysis to Infer Hydrological Behaviour of Lidder Watershed, Western Himalaya, India. **Geography Journal**, v. 2013, Article ID 178021, p.1-14, 2013.

AMARAL, R.; RIBEIRO, R. R. **Inundação e Enchentes**. In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. Desastres Naturais: conhecer para prevenir. 2 ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2012. cap. 3. p. 39-52.

ANA. **Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Informe 2015**. Brasília, p. 40, 2016.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R. D.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG.

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013.

ARAGÃO, R.; DE SANTANA G. R.; DA COSTA, C. E. F. F.; CRUZ, M. A. S.; DE FIGUEIREDO, E. E.; SIRINAVASAN, V. S. Chuvas intensas para o estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 243- 252, 2013.

ARMAS, A.; BEILICCI, R.; BEILICCI, E. Numerical Limitations of 1D Hydraulic Models Using MIKE11 or HEC-RAS software—Case study of Baraolt River, Romania. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, p. 072010. 2017.

ASCE task committee on definition of criteria for evaluation of watershed models of the watershed management committee, irrigation and drainage division. Criteria for evaluation of watershed models. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 119, n. 3, p. 429-442, 1993.

AVANZI, J. C. **Modelagem do escoamento superficial e erosão hídrica em uma microbacia hidrográfica na região dos Tabuleiros Costeiros**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais, 68p. 2005

AYVAZ, M. Tamer. A linked simulation–optimization model for simultaneously estimating the Manning’s surface roughness values and their parameter structures in shallow water flows. **Journal of hydrology**, v. 500, p. 183-199, 2013.

BALES, J. D.; WAGNER, C. R.; TIGHE, K. C.; TERZIOTTI, S. **LiDAR-derived flood-inundation maps for real-time flood-mapping applications, Tar River Basin, North Carolina**. Geological Survey (US), 2007.

BAJWA, H. S.; TIM, U. S. Toward immersive virtual environments for GIS-based Floodplain modeling and Visualization. In: **Proceedings of 22nd ESRI User Conference**. Texas, p. 8-12, 2002.

BAPTISTA, M. B.; COELHO M. M. L. P. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. 473 p.

BAPTISTA, M.B.; LARA, M. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2002.

BASTOS, G. A. P. **Análise dos parâmetros do modelo SWMM para avaliação do escoamento em duas bacias periurbanas em Santa Maria-RS.** (Dissertação) Universidade de Santa Maria, centro de tecnologia, pos-graduação em engenharia civil, 2007.

BHAGWAT, T. N.; SHETTY, A.; HEGDE, V. S. Spatial variation in drainage characteristics and geomorphic instantaneous unit hydrograph (GIUH); implications for watershed management—A case study of the Varada River basin, Northern Karnataka. **Catena**, v. 87, p. 52–59, 2011.

BHASKAR, N. R.; PARIDA, B. P.; NAYAK, A. K. Flood estimation for ungauged catchments using the GIUH. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 123, p. 228-238, 1997.

BERTONI, J. LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** 9. ed. São Paulo: Ícone, 2014.1450 p.

BESKOW, S. **LASH Model: a hydrological simulation tool in GIS framework.** Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 118. 2009.

BESKOW, S.; CALDEIRA, T. L. ; FARIA, L. C. ; NUNES, G. S. Legislação para autorizar o uso da água em uma bacia hidrográfica. In: Claudimir Rodrigues. (Org.). **Programa Gestor de Recursos Hídricos.** 1ªed.Santa Cruz do Sul: Essere Nel Mondo, 2015, v. , p. 22-24.

BESKOW, S.; CALDEIRA, T. L.; MELLO, C. R.; FARIA, L. C.; GUEDES, H. A. S. Multiparameter probability distributions for heavy rainfall modeling in extreme southern Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 123-133, 2015.

BESKOW, S. MELLO C. R.; COELHO, G.; DA SILVA, A. M.; VIOLA, M. R. Estimativa do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 169-178, 2009.

BESKOW, S.; NUNES, G. S.; MELLO, C. R. de.; CALDEIRA, T. L.; NORTON, L. D.; STEINMETZ, A. A.; VARGAS, M. M.; ÁVILA, L. F. Geomorphology-based unit hydrograph models for flood risk management: case study in Brazilian watersheds with contrasting physiographic characteristics. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1873-1890, 2018.

BESKOW, S.; SOUZA, M. R.; LUZ, E. P. D. Ciclo hidrológico. In: RODRIGUES, C. **Programa Gestor de Recursos Hídricos**. Santa Cruz do Sul: Essere Nel Mondo, 2015. Cap. 1, p. 6-12.

BEVEN, K. J. **Rainfall-runoff modelling: the primer**. 1^a. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

BHATTACHARYA, A. K.; MCENROE, B. M.; ZHAO, H.; KUMAR, D.; SHINDE, S. Modclark model: improvement and application. **IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)**, v. 2, n. 7, p. 100-118, 2012.

BHUYAN, M. K.; KUMAR, S.; JENA, J.; BHUNYA, P. K. Flood hydrograph with synthetic unit hydrograph routing. **Water Resources Management**, v. 29, n. 15, p. 5765-5782, 2015.

BICHANÇA, M. de F. **Bacias de retenção em zonas urbanas como contributo para a resolução de situações extremas: cheias e secas**. Dissertação (Mestrado em Vias de Comunicação). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal. 126p. 2006.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC . Brasília: **Diário Oficial da União**, seção 1, edição nº 70, 11 de abril de 2012.

BRUNDA, G. S.; NYAMATHI, S. J. Derivation and Analysis of Dimensionless Hydrograph and S Curve for Cumulative Watershed Area. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 964-971, 2015.

BRUNNER, G. W. **HEC-RAS River Analysis System: User's Manual, version 5.0**. Army Corps of Engineers. 2016.

BURDEN, R. L.; FAIRES, D. **Análise Numérica**. 8^a. ed. São Paulo: Cengage Learning, 721 p, 2013.

CALDEIRA, T. L. **Aprimoramento computacional do modelo Lavras Simulation of Hydrology (LASH): aplicação em duas bacias do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas, 2016.

CALDEIRA, T. L.; BESKOW, S.; MELLO, C. R. de.; GUEDES, H. A. S. Modelagem probabilística de eventos de precipitação extrema no estado do Rio Grande do Sul.

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, n. 3, p. 197-203, 2015.

CALDEIRA, T. L.; MELLO, C. R.; BESKOW, S.; TIMM, L. C.; VIOLA, M. R. LASH hydrological model: An analysis focused on spatial discretization. **Catena**, v. 173, p. 183-193, 2019.

CAMPOS, J. N. B. Lições em modelos e simulação hidrológica. **Fortaleza: ASTEF/Expressão Gráfica**, v. 1, p. 166, 2009.

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

CARVALHO, M. A. de; CHAUDRHY, F. H. Aplicação de hidrograma unitário geomorfológico na previsão de respostas hidrológicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 4, p. 5-17, 2001.

CASSALHO, F.; BESKOW, S.; VARGAS, M. M.; MOURA, M. M.; ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R. Hydrological regionalization of maximum stream flows using an approach based on L-moments. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, e27, 2017.

CHE, D.; NANGARE, M.; MAYS, L. W. Determination of Clark's unit hydrograph parameters for watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 2, p. 384-387, 2014.

CHEN, X.; CHEN, Y. D.; XU, C. Y. A distributed monthly hydrological model for integrating spatial variations of basin topography and rainfall. **Hydrological Processes**, v. 21, n. 2, p. 242-252, 2007.

CHOI, Y-J.; LEE, G.; KIM, J-C. Estimation of the Nash model parameters based on the concept of geomorphologic dispersion. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 16, n. 10, p. 806-817, 2011.

CHOW, V. T. **Handbook of Applied hydrology - a compendium of water resources technology**. New York: McGraw-Hill, 1964. 1495 p.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 588 p, 1988.

CHOW, V. T. **Open-channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 200 p, 1980.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1. ed. São Paulo: Edgar Blusher, 1999.

CLARK, C. O. Storage and the Unit Hydrograph. **Transactions American Society Civil Engineers**, v. 110, p. 1419-1488, 1945.

CRISS, R.E.; WINSTON, W.E. Discharge predictions of a rainfall-drive theoretical hydrograph compared to common models and observed data. **Water Resources Research**, v. 44, 2008.

COELHO FILHO, J. A. P.; DURÃES, M. F.; ARAÚJO, M. D. L. M.; BOAS, C. D. L. V. Simulação das cotas de extravasamento pelo uso da modelagem hidrológica e hidráulica em um trecho do rio Meia Ponte – GO. **Revista Scientia Agraria**, v. 16, n. 3, p. 76-90, 2015.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2013. 336p.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 194. 2001.

CORREIA, E. F. G.; RIBEIRO, G. P.; BAPTISTA, A. C. Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco de inundação. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 6, 2016.

COSTA, A. S.; CARIELLO, B. L.; BLANCO, C. J. C.; PESSOA, F. C. L. Regionalização de curvas de permanência de vazão de regiões hidrográficas do estado do Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 4, p. 413-422, 2012.

COUTINHO, M. M. **Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em**

Colatina/ES. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 126p. 2015.

CUNGE, J. A.; HOLLY, F. M.; VERWEY, A. **Practical aspects of computational river hydraulics.** 1980.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. **Estudo dos solos do município de Pelotas.** Pelotas, RS: EMBRAPA-CPACT, 1996, 54p. (EMBRAPA-CPACT, Documentos, 12).

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J.; SEVERO, C. R. S. **Estudo dos solos do município de Morro Redondo.** Pelotas, RS: EMBRAPA-CPACT, Ed. UFPel, 1996, 28p. (EMBRAPA-CPACT, Documentos, 23/96).

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J.; SEVERO, C. R. S.; SOARES, M. J.; COSTA, C. N.; NUNES, M. L; **Estudo dos solos do município de Canguçu.** Pelotas, RS: EMBRAPA-CPACT, Ed. UFPel, 1997, 90p. (EMBRAPA-CPACT, Documentos, 31/97).

CYSNE, J. R. **Modelo conceitual para gerenciamento de recursos hídricos em ambiente SIG.** Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Departamento de Computação do Centro de Ciências da Univeridade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 94. 2004.

DARIANE, A. B.; JAVADIANZADEH, M. M.; JAMES, L. D. Developing an efficient auto-calibration algorithm for HEC-HMS program. **Water resources management**, v. 30, n. 6, p. 1923-1937, 2016.

DI BALDASSARRE, G.; SHUMANN, G.; BATES, P. D.; FREER, J. E.; BEVEN, K. J. Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches. **Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques**, v. 55, n. 3, p. 364-376, 2010.

DOOGE, J. **Linear theory of hydrologic systems.** Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1973.

EID, N. J.; CAMPANA, N. A.; COSTA, J. Aplicação de distintas discretizações espaciais no modelo hidrológico concentrado precipitação-vazão HEC-HMS. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003, Curitiba. **Anais....** Curitiba-PR: ABRH, 2003.

ELESBON, A. A. A.; GUEDES, H. A. S.; DA SILVA, D. D.; DE CASTRO, I. Uso de dados SRTM e plataforma SIG na caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Braço Norte do Rio São Mateus-Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 3, p. 281-288, 2011.

EMBRAPA - **Estação Agroclimatológica de Pelotas**, Convênio Embrapa/UFPEL, 2015. Disponível em: <goo.gl/8lliNM>. Acesso em: 23 jan. 2019.

ESRI, ArcGIS DESKTOP 10.1. Redlands, CA: **Environmental Systems Research Institute**, Inc. (Esri), 2014. CD-ROM.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.19, n.1, p.243-254, 2014.

FEPAM - **Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Roessler**. Monitoramento da Qualidade da Água da Região Hidrográfica das Bacias Litorâneas. Site oficial da FEPAM. 2016. Disponível em: <goo.gl/2nq90h>. Acesso em: 23 jan. 2019.

FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; DA SILVA, A. E. A.; JOHANN, J. A.; BORSSOI, J. A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, 2008.

FERRAZ, M. I. F.; SÁFADI, T.; LAGE, G. Uso de modelos de séries temporais na previsão de séries de precipitação pluviiais mensais no município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, n.2, p.259-267, 1999.

FLEMING, M. J.; DOAN, J. H. **HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension: User's Manual, Version 10.1**. Army Corps of Engineers. 2013.

FRIEDRICH, M. F.; OTA, J. J. Modelagem computacional de escoamento fluvial: estudo de sensibilidade de parâmetros e condições de contorno. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v. 15, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. CD-Rom.

GIBBS, M. S.; DANDY, G. C.; MAIER, H. R. Evaluation of parameter setting for two GIS based unit hydrograph models. **Journal of Hydrology**, v. 393, n. 3, p. 197-205, 2010.

GHUMMAN, A. R.; AHMAD, M. M.; HASHMI, H. N.; KAMAL, M. A. Developmente of geomorphologic instantaneous unit hydrograph for a large watershed. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n. 4, p. 3153-3163, 2011.

GRAF, J. B.; GARKLAVS, G.; OBERG, K. A. **Time of concentration and storage coefficient values for Illinois streams: U.S.** Geological Survey Water-Resources Investigations Report 82-13, 35 p, 1982.

GRACIOSA, M. C. P. **Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão do risco de inundações.** Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 163. 2010.

GREEN, C. H.; TOMER, M. D.; DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. G. Hydrologic evaluation of the Soil and Water Assessment Tool for a large tile-drained watershed in Iowa. **Transactions of the ASABE**, v.49, p.413-422, 2006.

GRIBBIN, J. E. **Introduction to Hydraulics & Hydrology: With Applications for Stormwater Management.** Nelson Education, 2013.

GUEDES, H. A. S.; SILVA, D. D. da. Comparison between hydrographically conditioned digital elevation models in the morphometric characterization of watersheds. **Engenharia Agrícola**, v. 32, p. 932-943. 2012.

HALWATURA, D.; NAJIM, M. M. M. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. **Environmental modelling & software**, v. 46, p. 155-162, 2013.

HAO, F; SUM, M; GENG, X.; HUANG, W.; OUYANG W. Coupling the Xinanjiang model with geomorphologic instantaneous unit hydrograph for flood forecasting in northeast China. **International Soil and Water Conservation Research**, v.3, p. 66-76, 2015.

HARTMANN, H. C.; BALES, R.; SOROOSHIAN, S. **Weather, climate and hydrologic forecasting for the southwest U.S.** Tucson: The University of Arizona, 172 p, 1999.

HASENACK, H.; WEBER, E. **Base cartográfica vetorial continua do Rio Grande do Sul – escala 1:50.000.** UFRGS - Centro de Ecologia. Porto Alegre. 2010.

HOSSEINI, S. M.; MAHJOURI, N.; RIAHI, S. Development of a Direct Geomorphologic IUH Model for Daily Runoff Estimation in Ungauged Watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 6, 2016.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico**. Banco de Dados Agregados. Rio de Janeiro: IBGE: 2010. Disponível em: <goo.gl/b8Nhel>. Acesso em: 23 jan. 2019.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **ProGrid**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/param_transf/default_param_transf.shtm>. Acesso em: 26 de jan. 2019.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **MAPGEO2015**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm>. Acesso em: 26 de jan. 2019.

IBRAHIM-BATHIS, K.; AHMED, S. A. Rainfall-runoff modelling of Doddahalla watershed—an application of HEC-HMS and SCN-CN in ungauged agricultural watershed. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 9, n. 3, p. 1-16, 2016.

JABUR, A. S.; RIZZI, N. E. Estimativas da vazão máxima e capacidade de saturação hídrica da bacia hidrográfica do Alto do Rio Ligeiro em Pato Branco, PR. *Revista Floresta*, v. 41, n. 4, p. 833 - 846, 2011.

JAIN, V.; SINHA, R. Derivation of unit hydrograph from GIUH analysis for a Himalayan river. **Water Resources Management**, v. 17, n. 5, p. 355-376, 2003.

JENA, S. K.; TIWARI, K. N. Modeling synthetic unit hydrograph parameters with morphologic parameters of watersheds. **Journal of Hydrology**, v. 319, p. 1-14, 2006.

JIAO, P.; XU, D.; WANG, S.; YU, Y.; HAN, S. Improved SCS-CN Method Based on Storage and Depletion of Antecedent Daily Precipitation. **Water Resources Management**, v. 29, n. 13, p. 4753-4765, 2015.

JOO, J.; KJELDSEN, T.; KIM, H.J.; LEE, H. A comparison of two event-based flood models (ReFH-rainfall runoff model and HEC-HMS) at two Korean catchments, Bukil and Jeungpyeong. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 18, n. 1, p. 330-343, 2014.

KAMALI, B.; MOUSAVI, S. J.; ABBASPOUR, K. C. Automatic calibration of HEC-HMS using single-objective and multi-objective PSO algorithms. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 26, p. 4028-4042, 2013.

KIM, Y.; TACHIKAWA, Y.; SHIIBA, M.; KIM, S.; YOROZU, K.; NOH, S. J. Simultaneous estimation of inflow and channel roughness using 2D hydraulic model and particle filters. **Journal of Flood Risk Management**, v. 6, n. 2, p. 112-123, 2013.

KNEBL, M. R.; YANG, Z. L.; HUTCHISON, K.; MAIDMENT, D. R. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. **Journal of Environmental Management**, v. 75, n. 4, p. 325-336, 2005.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2001.

KULL, D. W.; FELDMAN, A. D. Evolution of Clark's unit graph method to spatially distributed runoff. **Journal of Hydrologic engineering**, v. 3, n. 1, p. 9-19, 1998.

KUMAR, R.; CHATTERJEE, C.; KUMAR, S.; LOHANI, A. K.; SINGH, R. D. Development of regional flood frequency relationships using L-moments for middle Ganga plains subzone 1(f) of India. **Water Resources Management**, v. 17, n. 4, p. 243-257, 2003.

LAOUACHERIA, F.; MANSOURI, R. Comparison of WBNM and HEC-HMS for runoff hydrograph prediction in a small urban catchment. **Water Resources Management**, v. 29, n. 8, p. 2485-2501, 2015.

LEE, K. T.; YEN, B. C. Unit Hydrograph Theory: A 60-Year Unfulfilled Promise. In: **Building Partnerships**. ASCE, 2000. p. 1-8.

LONDE, L. R.; COUTINHO, M. P.; GREGÓRIO, L. T. D.; SABTOS, L. B. L.; SORIANO, E. Desastres relacionados à água no Brasil: perspectivas e recomendações. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 17, p. 133-152, 2014.

LÓPEZ, J. J.; GIMENA, F. N.; GIRALDEZ, J. V.; AYUSO, J. L.; & GONI, M. Comparative analysis of a geomorphology-based instantaneous unit hydrograph in small mountainous watersheds. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 19, p. 2909-2924, 2012.

LYRA, G. B.; CECÍLIO R. A.; ZANETTI, S. S.; LYRA, G. B. Coeficiente de rugosidade de Manning para o rio Paracatu. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 14, n. 4, 2010.

MAIDMENT, D. R. **Handbook of Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993.

MARCELINO, E. V. **Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos. Caderno didático**, v. 1, p. 34, 2008. Disponível em: <<http://www.inpe.br/crs/geodesastres/imagenspublicacoes/conceitosbasicos.pdf>>. Acesso em: 24 jan.2019.

MARCELINO, I. P. O. **Análise de episódios de tornados em Santa Catarina: caracterização sinótica e mineração de dados**. São José dos Campos: INPE, 223p, 2003.

MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI, J. C.; MAGALHÃES, L. L. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

MARTINS, J. A. Escoamento superficial. In: PINTO, N. L. S. et al. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1976. 278 p

MARTINS, V. S.; GUEDES, H. A. S.; CAPOBIANGO, G. V.; SILVA, D. D. A importância do condicionamento hidrográfico no estudo morfométrico de bacias. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Curitiba. **Anais...** INPE, p. 5418-5425, 2011.

MASOERO, A.; CLAPS, P.; ASSELMAN, N. E. M.; MOSSELMAN, E.; DI BALDASSARE, G. Reconstruction and analysis of the Po River inundation of 1951. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 9, p. 1341-1348, 2013.

MELLO, C. R. de; LIMA, J. M. de; SILVA, A. M. da; LOPES, D. Abstração inicial da precipitação em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero Initial abstraction of small watersheds of ephemeral flood. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 7, n. 3, p. 494-500, 2003.

MELLO, C. R. de.; SILVA, A. M. D. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. 1ª. ed. Lavras: UFLA, 2013. 455 p.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios e aplicação**. 1 ed. Porto Alegre, ABRH, 2001. 536p.

MEENU, R.; REHANA, S.; MUJUMDAR, P. P. Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga–Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM. **Hydrological Processes**, v. 27, p. 1572-1584, 2013.

MERZ, B.; KREIBICH, H.; SCHWARZE, R.; THIEKEN, A. Review article “assessment of economic flood damage”. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 10, n. 8, p. 1697-1724, 2010.

MIRANDA, R. A. C.; OLIVEIRA, M. V. S.; SILVA, D. F. D. Ciclo hidrológico planetário: abordagens e Conceitos. **Geo UERJ**, v. 1, n. 21, p. 109-119, 2010.

MISHRA, S. K.; SINGH, V. **Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology**. Springer Science & Business Media, 516 p, 2013.

MIKHAILOVA, M. V; MIKHAILOV, V. N.; MOROZOV, V. N. Extreme Hydrological Events in the Danube River Basin over the Last Decades. **Water Resources and the Regime of Water Bodies**, 2012, v. 39, n. 2, p. 161–179, 2012.

MOHAVE COUNTY. **Drainage design manual for Mohave County**. 70p., 2009.

MONTE, B. E. O.; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHÃES, L. D. O.; UVO, C. B. Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 152-167, 2016.

MONTEIRO, M. A; FURTADO, S. O clima do trecho Florianópolis – Porto Alegre: uma abordagem dinâmica. **Geosul**, v. 10, n. 19/20, p.117-133, 1995.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MOURA, de M.M. **Influência de diferentes fontes e escalas de informação do relevo sobre a estimativa de cheias a partir do Hidrograma Unitário**

Instântaneo de Nash. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, p. 30, 2018.

MULUNGO, H. E. **Estudo de inundação da bacia do campus da UFSC, Florianópolis-SC.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 40, 2012.

MUNYANEZA, O.; MUKUBWA, A.; MASKEY, S.; UHLENBROOK, S.; WENNINGER, J. Assessment of surface water resources availability using catchment modelling and the results of tracer studies in the mesoscale Migina Catchment, Rwanda. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 12, p. 5289-5301, 2014.

NAGARAJAN, N.; POONGOTHAI, S. Spatial mapping of runoff from a watershed using SCS-CN method with remote sensing and GIS. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 11, p. 1268-1277, 2012.

NAIR, H. C.; PADMALAL, D.; JOSEPH, A.; VINOD, P. G. Delineation of Groundwater Potential Zones in River Basins Using Geospatial Tools—an Example from Southern Western Ghats, Kerala, India. **Journal of Geovisualization and Spatial Analysis**, v. 1, n. 5, 2017.

NASCIMENTO, E. L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? **Revista Brasileira de Meteorologia**, 20, p. 121-140, 2005.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282- 298, 1970.

NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. **The computer journal**, v. 7, n. 4, p. 308-313, 1965.

NGUYEN, H. Q.; MAATHUIS, B. H. P.; RIENTJES, T. H. M. Catchment storm runoff modelling using the geomorphologic instantaneous unit hydrograph. **Geocarto International**, v. 24, n. 5, p. 357-375, 2009.

NOURANI, V.; SINGH, V. P.; DELAFROUZ, H. Three geomorphological rainfall-runoff models based on the linear reservoir concept. **Catena**, v. 76, n. 3, p. 206-214, 2009.

NUNES, G. S. **Aplicabilidade de modelos de hidrograma unitário em bacias hidrográficas hidrologicamente distintas**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 187p. 2015.

OLIVERA, F.; MAIDMENT, D. Geographic Information Systems (GIS) based spatially distributed model for runoff routing. **Water Resources Research**, v. 35, n. 4, p. 1155-1164, 1999.

OSMAN, S; ABUSTAN, I. Estimating the Clark Instantaneous Unit Hydrograph parameters for selected gauged catchments in the west Coast of Peninsular Malaysia. **ASEAN Engineering Journal Part C**, v. 1, n. 3, 2012.

OZDEMIR, H.; BIRD, D. Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point of floods. **Environmental Geology**, v. 56, p. 1405–1415, 2009.

PARMIGIANI, M. A. **Análise das áreas inundadas e os respectivos impactos devido aos diferentes valores do coeficiente de rugosidade no rompimento da Barragem de Monjolinho**. Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS, Trabalho de conclusão de curso, para obtenção do título Engenheiro Ambiental, 2017.

PAUDEL, M.; NELSON, E. J.; SCHARFFENBERG, W. Comparison of lumped and quasi-distributed Clark runoff models using the SCS curve number equation. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, n. 10, p. 1098-1106, 2009.

PERROTTA, M. M. **Processamento digital básico de imagens de sensores remotos ópticos para uso em mapeamento geológico – Programa ENVI**. Belo Horizonte: CPRM, 2005. 43 p.

PETERS, J. C.; EASTON, D. J. Runoff Simulation Using Radar Rainfall Data. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 3, n. 4, p. 753-760, 1996.

PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A. Hidrologia básica. In: **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1976.

PRAJAPATI, P. R.; VADHER, B. M.; YADAV, S. M. Comparative analysis of hydraulic roughness coefficient at Purna River sites. **Global Research and Development Journal for Engineering**, v. 1, n. 4, p. 574-579, 2016.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. dos S.; SILVA, D. D. da. **Escoamento superficial**. 1.ed. Viçosa: UFV, 2003. 88 p.

PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. Runoff curve number: Has it reached maturity?. **Journal of hydrologic engineering**, v. 1, n. 1, p. 11-19, 1996.

PORTO, R. L. L.; ZAHED FILHO, K.; MARCELLINI, S. S. **Escoamento Superficial**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 26 p, 1999.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. EESC-USP, São Carlos/SP, 519p, 2006.

RAGHUNATH, H. M. **Hydrology: Principles, Analyses and Design**. New Delhi: New Age International, 2006. 476 p.

RAZMKHAH, H.; AKHOUNDALI, A. M.; RADMANESH, F. Correlated Parameters Uncertainty Propagation in a Rainfall-Runoff Model, Considering 2-Copula; Case Study: Karoon III River Basin. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 22, n. 5, p. 503-521, 2017.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José, p. 146. 2003.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Conceitos Básicos de Modelagem Hidrológica**. In: Margareth Simões Penello Meirelles; Gilberto Camara; Cláudia Maria de Almeida. (Org.). **Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais**. 1ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, v. 11, p. 529-556, 2007.

REZAIE, A. M.; SUMAYA; ALAM, S.; AHMED, I.; AHMED, H; KADIR, MD. N; SIDDIQUE, M. K. B; JISAN, M. A.; RAHMAN, M. computation of discharge and flow volume for different flooding scenario in the lower Meghna Estuary. In: **II International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development (ICCESD)**, Bangladesh, 2014.

RIBEIRO, C. B. M.; LIMA, R. N. S. Modelagem Hidrológica e Hidráulica para Simulação de Inundações em uma Bacia Hidrográfica na Área Urbana do Município de Juiz de Fora/MG. In: **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Maceió: ABRH, 2011.

RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. New York: Springer Verlag, 2006. 494 p.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998. 840 p.

RODRIGUEZ-ITURBE, I.; VALDEZ, J. B. The geomorphologic structure of hydrologic response. **Water Resources Research**, v. 15, n. 6, p. 1409-1420, 1979.

ROUSSEAU, M.; CERDAN, O.; ERN, A.; MAITRE, O. L.; SOCHALA, P. Study of overland flow with uncertain infiltration using stochastic tools. **Advances in Water Resources**, v. 38, p. 1-12, 2012.

RYU, J.; JANG, W. S.; KIM, J.; CHOI, J. D.; ENGEL, B. A.; YANG, J. E.; LIM, K. J. Development of a Watershed-Scale Long-Term Hydrologic Impact Assessment Model with the Asymptotic Curve Number Regression Equation. **Water**, v. 8, n. 4, p. 153, 2016.

SADEGHI, S. H. R.; MOSTAFAZADEH, R.; SADODDIN, A. Changeability of simulated hydrograph from a steep watershed resulted from applying Clark's IUH and different time–area histograms. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 4, p. 3629-3643, 2015.

SAHOO; B; CHATTERJEE, C.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R.; KUMAR, R. Flood Estimation by GIUH-Based Clark and Nash Models. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 11, n. 6, p. 515 – 525, 2006.

SANCHEZ, F. J. **Medidas puntuales de permeabilidad**. Universidad de Salamanca, p. 13, 2011.

SANEP - **Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas**, 2015. Disponível em: <goo.gl/HkqYpJ>. Acesso em: 23 jan. 2019.

SANT'ANNA NETO, J. L. **As chuvas no Estado de São Paulo: contribuição ao estudo da variabilidade e tendência da pluviosidade na perspectiva da análise geográfica**. São Paulo: USP/FFLCH, 1995.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R.M. Aplicação do modelo hidrológico AÇUMOD baseado em SIG para a gestão de recursos hídricos do rio Pirapama, Pernambuco, Brasil. **Ambi-Água**, v. 2, n. 2, p. 07-20, 2007.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. **rev. e ampl.** Brasília: Embrapa, p. 353, 2013.

SANTOS, I. D.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T., MARONE, E.; LAUTERT, L. F. Hidrometria aplicada. **Curitiba: Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento**, 2001.

SANTOS, G. S.; NORI, P. G. OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.115-123, 2010.

SARAIVA, I.; FERNANDES, W.; NAGHETTINI, M. Simulação hidrológica mensal em bacias sem monitoramento fluviométrico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.16, p.115-125, 2011.

SARANGI, A.; MADRAMOOTOO, C. A.; ENRIGHT, P.; PRASHER, S. O. Evaluation of three unit hydrograph models to predict the surface runoff from a Canadian watershed. **Water Resources Management**, v. 21, n. 7, p. 1127-1143, 2007.

SCHARFFENBERG, W.; FLEMING, M. J. **Hydrologic modeling system HEC-HMS: User's manual**. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2010.

SCHARFFENBERG, W. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's manual, Version 4.1**. Army Corps of Engineers. 2015.

SCS. **National Engineering Handbook**. Washington: Soil Conservation Service/USDA. Technical Release n. 55, 1971.

SHEEDER, S. A.; ROSS, J. D.; CARLSON, T. N. Dual urban and rural hydrograph signals in three small watersheds 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 38, n. 4, p. 1027-1040, 2002.

SHERIDAN, J. M. Hydrograph time parameters for flatland watersheds. **Transactions of the ASAE**, v. 37, n. 1, p. 103-113, 1994.

SHERMAN, L. K. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. **Engineering News Record**, v. 108, p. 501-505, 1932.

SILVA DIAS, M. A. F. **Complexos convectivos de mesoescala**. Climanálise. Cachoeira Paulista: MCT/INPE/CPTEC, edição especial, p.173-182, 1996.

SILVA, M. M. G. T.; WEERAKOON, S. B.; HERATH, Srikantha. Modeling of Event and Continuous Flow Hydrographs with HEC–HMS: Case Study in the Kelani River Basin, Sri Lanka. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 4, p. 800-806, 2014.

SILVA, P. M. de O.; MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. da; COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 258-265, 2008.

SILVA, R. C. V da; MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G. **Hidráulica fluvial**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 304p, 2007.

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

SNYDER, F. F. Synthetic unit-graphs. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 19, n. 1, p. 447-454, 1938.

SPAROVEK, G.; VAN LIER, Q.; DOURADO NETO, D. Computer assisted Koeppen climate classification: a case study for Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 2, p. 257-266, 2007.

ŠRAJ, M.; DIRNBEK, L.; BRILLY, M. The influence of effective rainfall on modeled runoff hydrograph. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 58, n. 1, p. 3-14, 2010.

STACKELBERG, P. E.; GIBBS, J.; FURLONG, E. T.; MEYER, M. T.; ZAUGG, S. D.; LIPPINCOTT, R. L. Efficiency of conventional drinking-water-treatment processes in removal of pharmaceuticals and other organic compounds. **Science of the Total Environment**, v. 377, p. 255–272, 2007

STEINMETZ, A. A. **Estimativa de cheias aplicando a técnica de hidrograma unitário com diferentes abordagens de discretização espacial em uma sub-bacia do arroio Pelotas**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.

STRAUB, T. D.; MELCHING, C. S.; KOCHER, K. E. **Equations for estimating Clark unit-hydrograph parameters for small rural watersheds in Illinois**. US Dept. of the Interior, US Geological Survey; Branch of Information Services, 2000.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS; UFRGS, 2008. 126 p.

SULE, B. F.; ALABI, S. A. Application of synthetic unit hydrograph methods to construct storm hydrographs. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, v. 5, n. 11, p. 639-647, 2013.

SWAIN, J. B.; JHA, R.; PATRA, K. C. Stream flow prediction in a typical ungauged catchment using GIUH approach. *Aquatic Procedia*, v. 4, p. 993 – 1000, 2015.

TEIXEIRA, E. K. da C.; COELHO, M. M. L. P.; PINTO, E. J. de A.; DINIZ, J. G.; SALIBA, A. P. M. Manning's roughness coefficient for the Doce River. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 23, 2018.

THIESSEN, A.; ALTER, J. C. Precipitation averages for large areas. Climatological Data For July, 1911. *Monthly Weather Review*, v. 39, n. 10, p. 1082-1084, 1911.

TOBLER, W. Measuring spatial resolution. In: **Proceedings of the International Workshop on Geographic Information Systems**. 1987.

TOMINAGA L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Orgs.) **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 1. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L.; ALVARES, C. A.; RIBEIRO, S.; LEITE, F. P. Morfometria da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães – MG. *Competência: Revista Árvore*, v.30, n.5, p.849-857, 2006.

THIESSEN, A.; ALTER, J. C. Precipitation averages for large areas. Climatological Data For July, 1911. *Monthly Weather Review*, v. 39, n. 10, p. 1082-1084, 1911.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações Urbanas na América do Sul**. ABRH, Ed. UFRGS, Porto Alegre – RS, 2003. 471 p.

TUCCI, C. E. M. Gestão integrada das águas urbanas. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 5, n. 2, p. 71-81, 2008.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª. ed. Porto Alegre: UFRGS, 94 p, 2009.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 678 p, 2005.

VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. **Journal of Hydrological Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

VEBER, C. L. P. **Desempenho de modelos de hidrograma unitário em duas bacias hidrográficas com comportamento hidrológico contrastante**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, p. 113. 2016.

VIANNA, A. P. P. **Utilização de modelgens Hidrológicas e Hidráulica associadas a um sistema de infirmações geográficas para mapeamentos de áreas inundáveis. Estudo de caso: Município de Itajubá - MG**. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte, 2000.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 245 p., 1975.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na cabeceira da Bacia Hidrográfica do Rio Grande de cenários de usos do solo e mudanças climáticas A1B**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 286. 2011.

VOROGUSHYN, S.; MERZ, B.; LINDENSCHMIDT, H. A. A new methodology for flood hazard assessment considering dike breaches. **Water Resources Research**, v. 46, n. 8, 2010.

WAŁĘGA, A. Application of HEC-HMS programme for the reconstruction of a flood event in an uncontrolled basin/Zastosowanie programu HEC-HMS do odtworzenia wezbrania powodziowego w zlewni niekontrolowanej. **Journal of Water and Land Development**, v. 18, n. 9, p. 13-20, 2013.

WATTS, L. F.; HAWKE, R. M. The effects of urbanization on hydrologic response: a study of two coastal catchments. *Journal of Hydrology (NZ)*, **New Zealand Hydrological Society**, v. 42, n. 2, p. 125 - 143, 2003.

WEI, W.; CHEN, L.; FU, B.; HUANG, Z.; WU, D.; GUI, L. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. **Journal of hydrology**, v. 335, n. 3-4, p. 247-258, 2007.

WWAP - WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME (UNITED NATIONS). Water for People, Water for Life: A Joint Report by the Twenty-three UN Agencies Concerned with Freshwater. Unesco, 2003.

YU, B. Validation of SCS method for runoff estimation. **Journal of Hydrology Engineering**, v. 17, n. 11, p.1158-1163, 2012.

YU, P-S.; JENG, Y-C. A study on grid based distributed rainfall runoff models. **Water resources management**, v. 11, n. 2, p. 83-99, 1997.

ZINK, J. M.; JENNINGS, G. D. Channel Roughness in North Carolina Mountain Streams. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 50, n. 5, p. 1354-1358, 2014.

Apêndices

Apêndice A – Hidrogramas de ESD

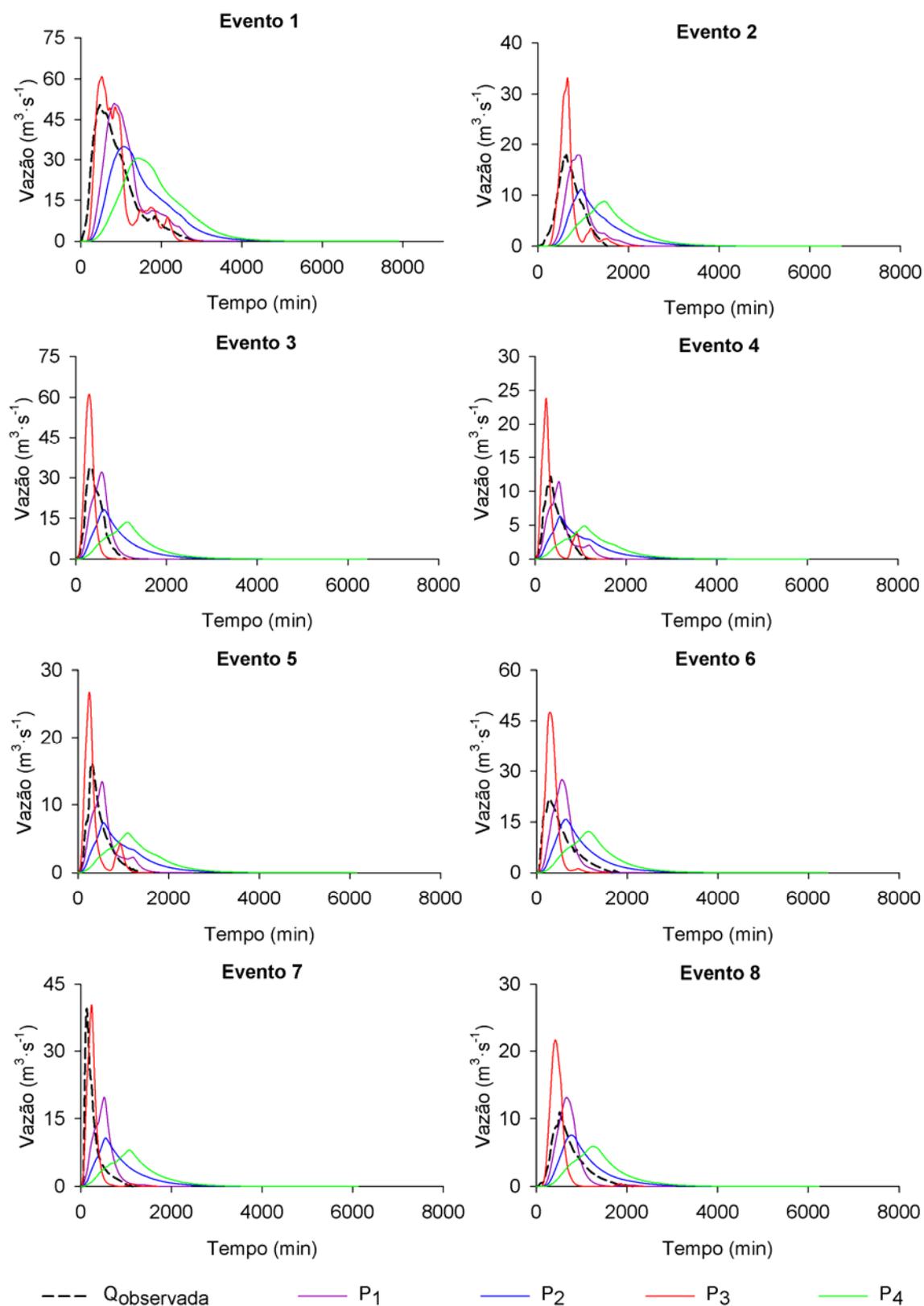


Figura 1A - Hidrogramas de ESD estimados pelo modelo MoClark e o hidrograma de ESD observado na seção de controle da BHAC para cada evento analisado.

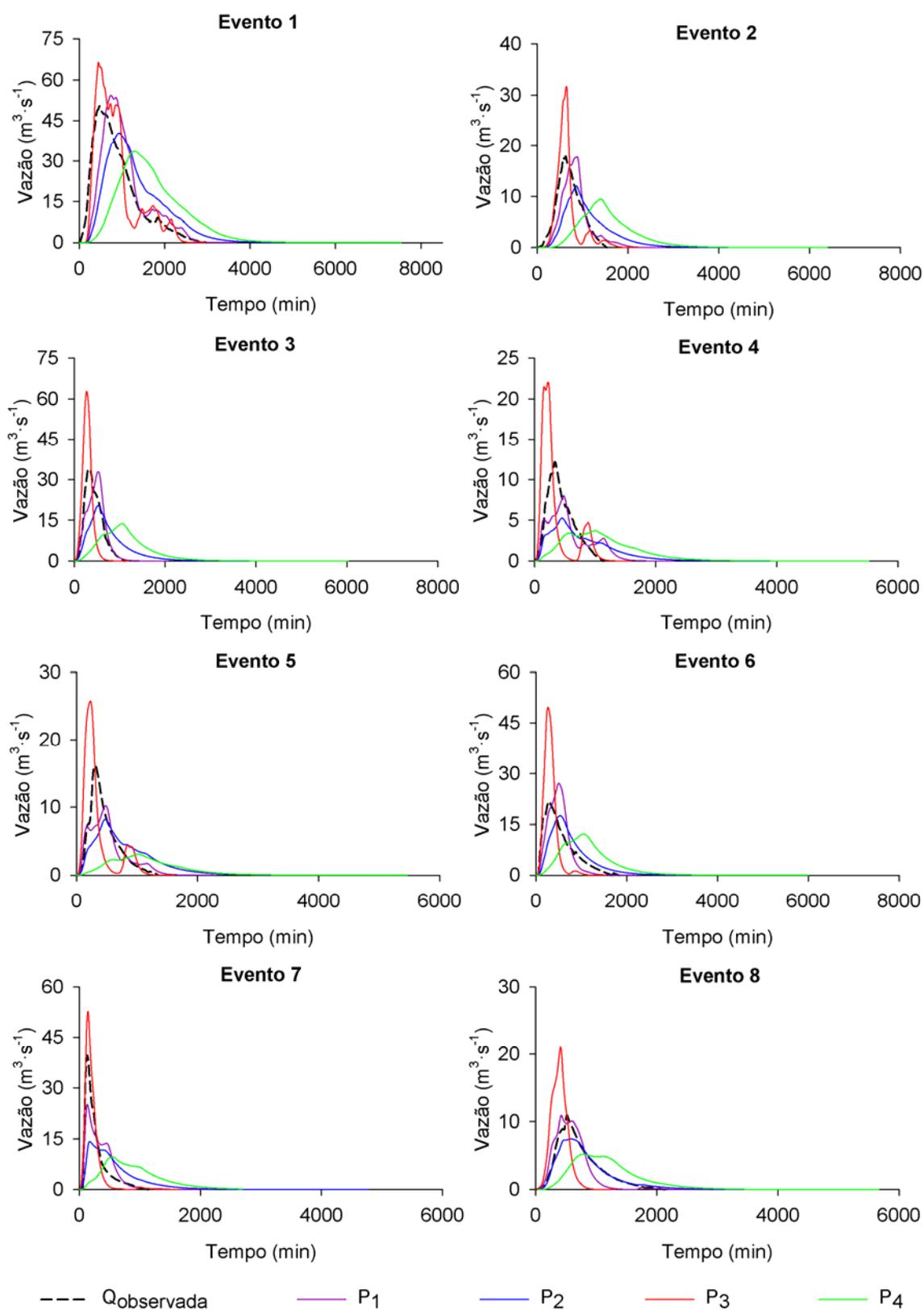


Figura 2A - Hidrogramas de ESD estimados pelo modelo Moclark e o hidrograma de ESD observado na seção de controle da BHAC para cada evento analisado referente a Seção 1.

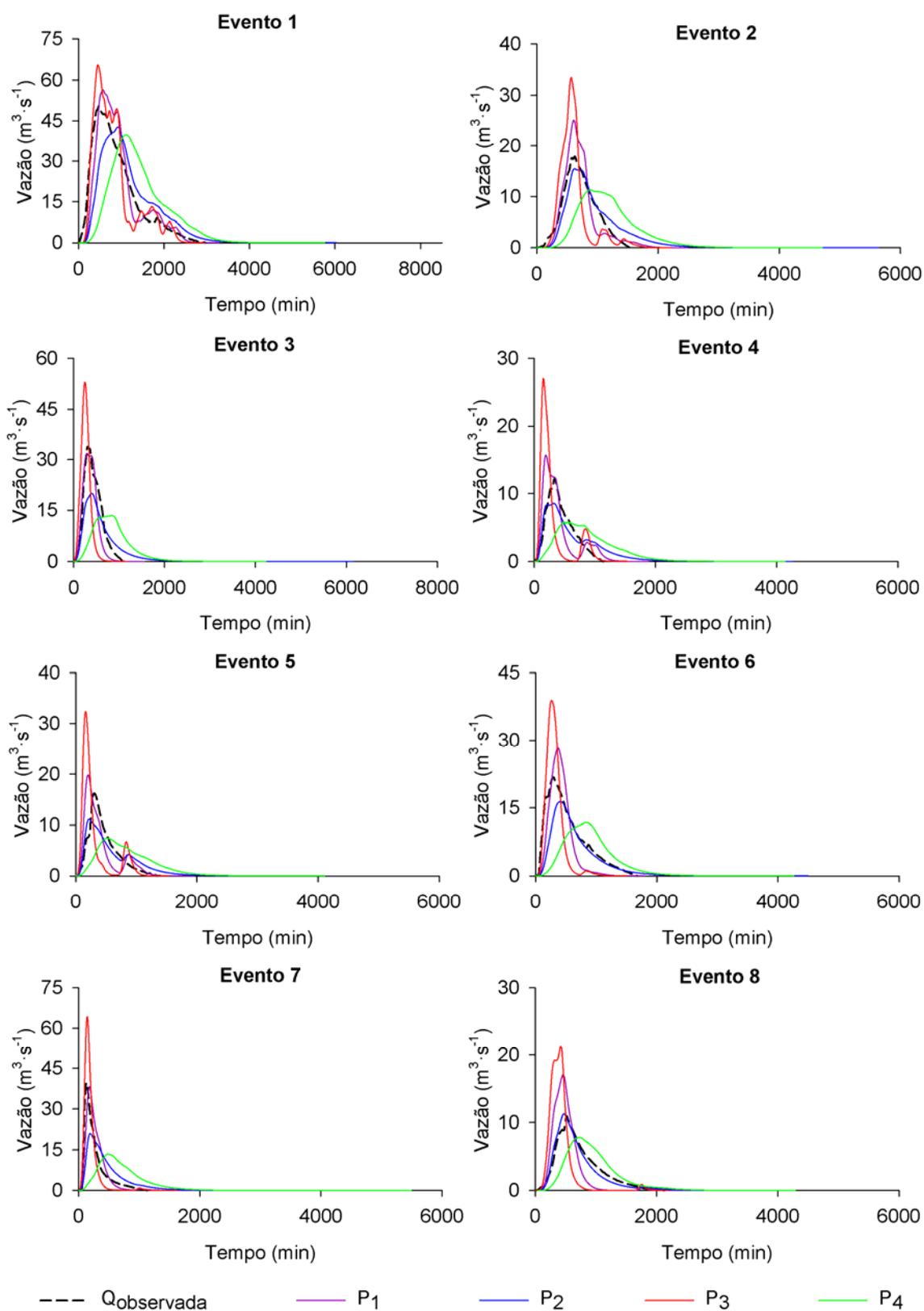


Figura 3A - Hidrogramas de ESD estimados pelo modelo MoClark e o hidrograma de ESD observado na seção de controle da BHAC para cada evento analisado referente a Seção 2.

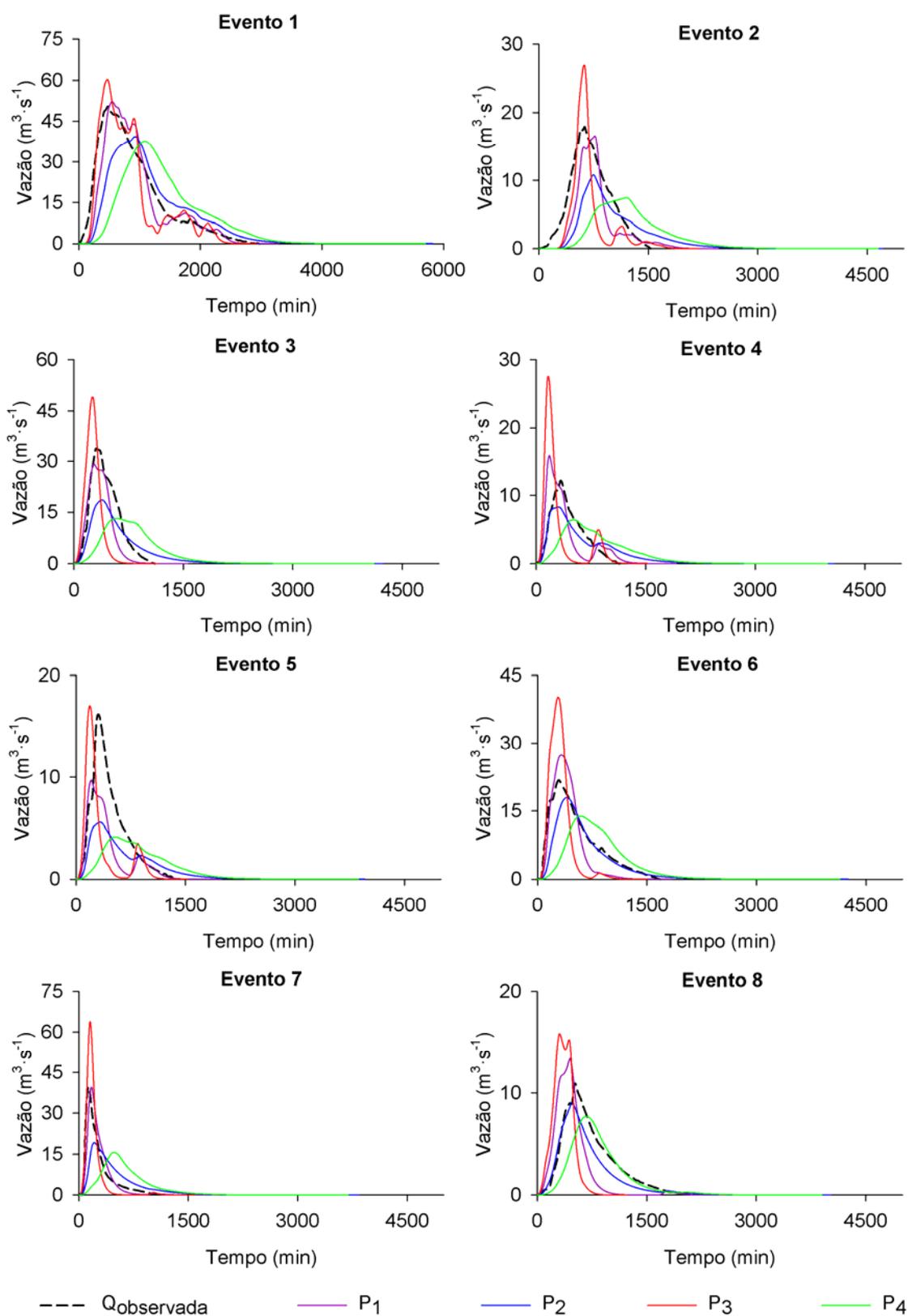


Figura 4A - Hidrogramas de ESD estimados pelo modelo MoClark e o hidrograma de ESD observado na seção de controle da BHAC para cada evento analisado referente a Seção 3.

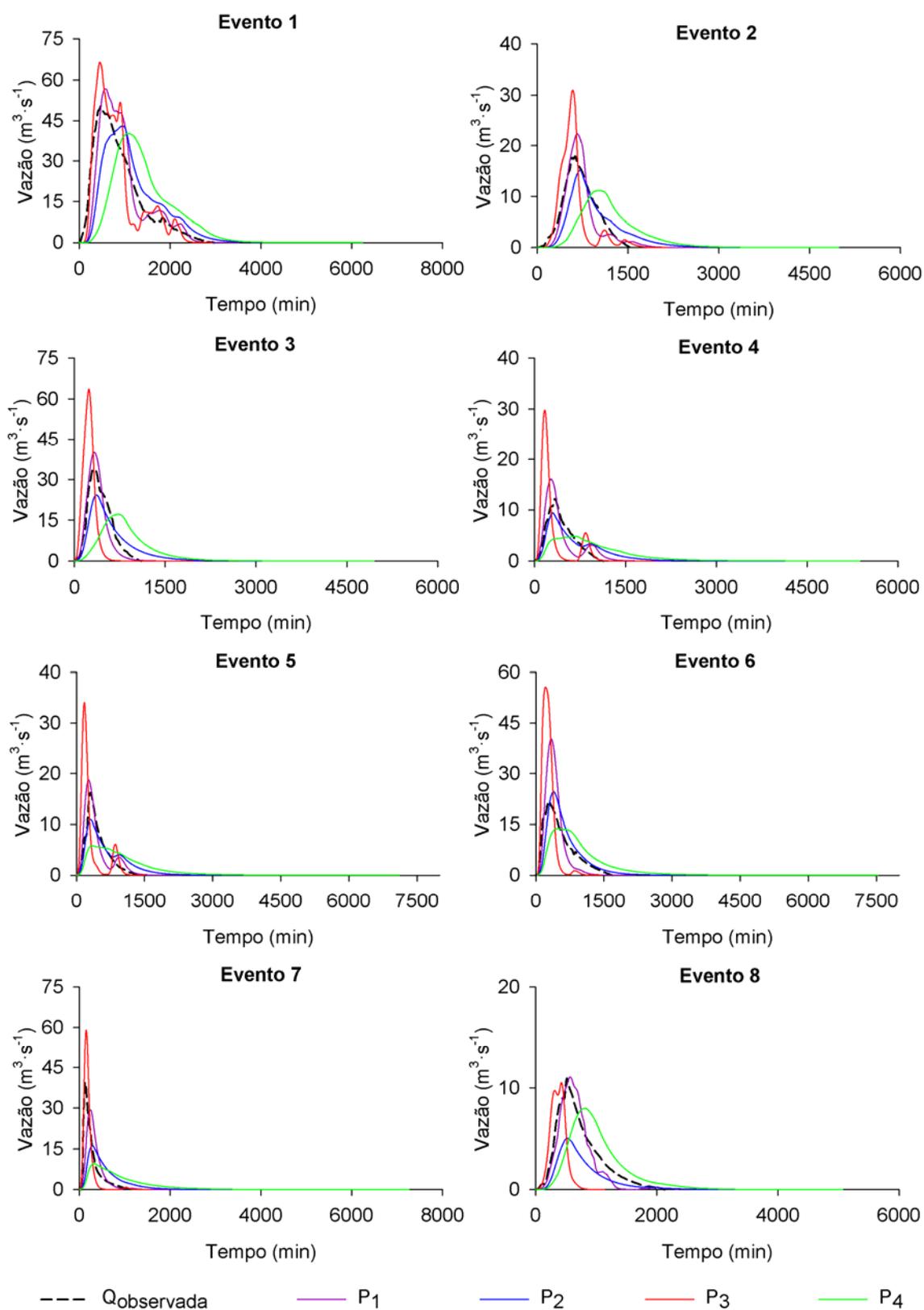


Figura 5A - Hidrogramas de ESD estimados pelo modelo Moclark e o hidrograma de ESD observado na seção de controle da BHAC para cada evento analisado referente a Seção 4.

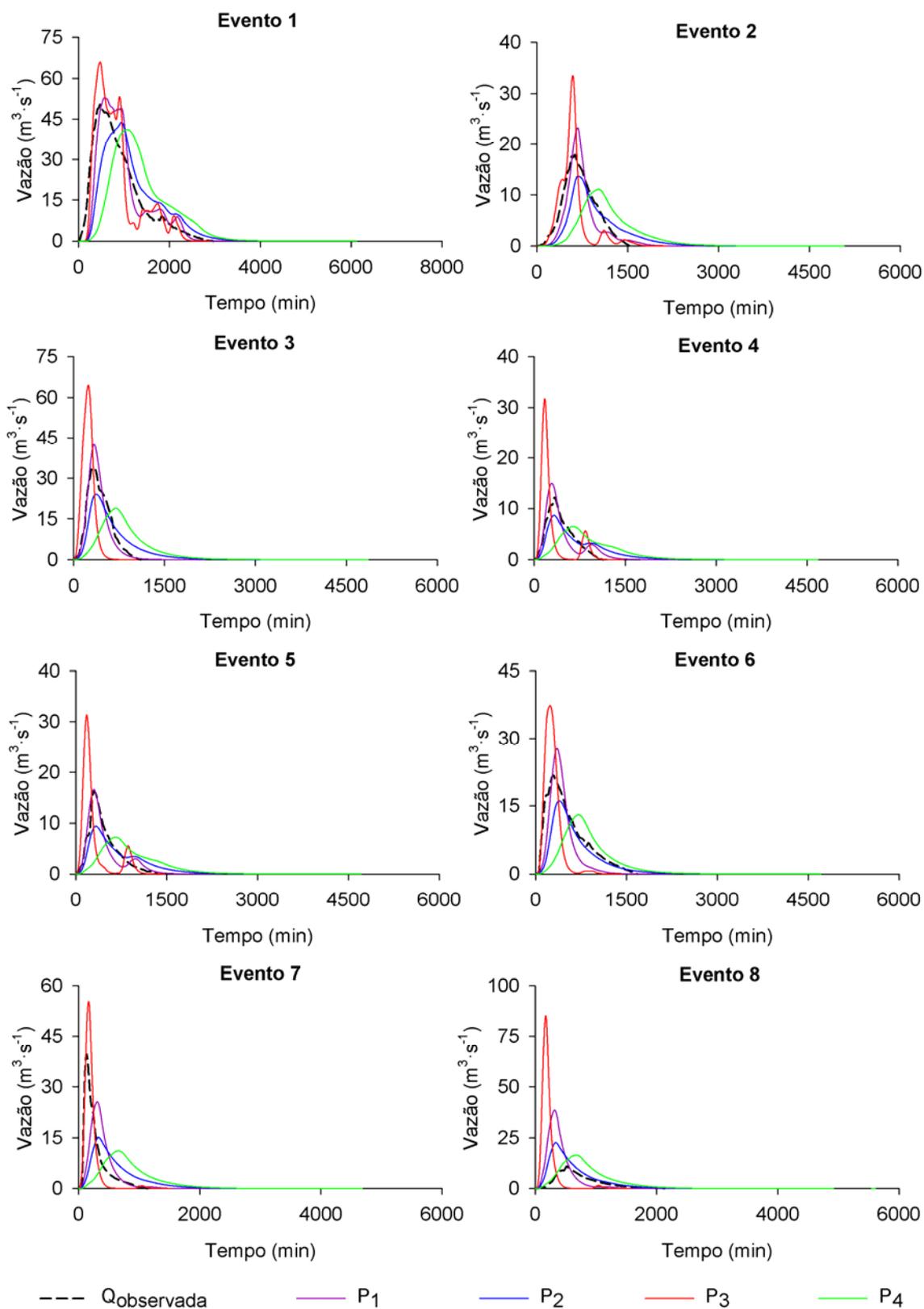


Figura 6A - Hidrogramas de ESD estimados pelo modelo MoClark e o hidrograma de ESD observado na seção de controle da BHAC para cada evento analisado referente a Seção 5.

Apêndice B – Perfil longitudinal da linha d'água

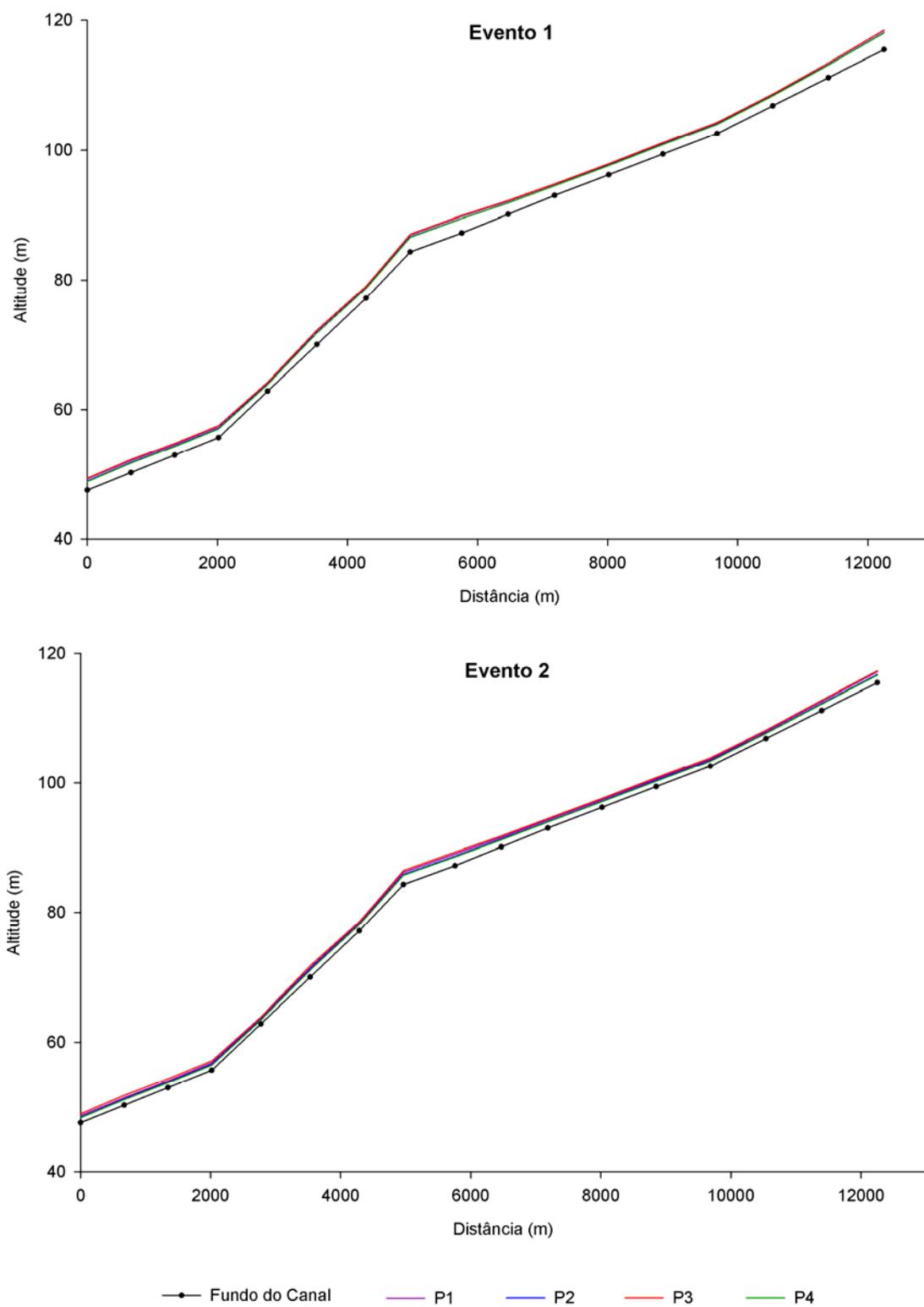


Figura 1B – Perfil longitudinal da linha d'água resultantes dos eventos 1 e 2 empregado as propostas geomorfológicas.

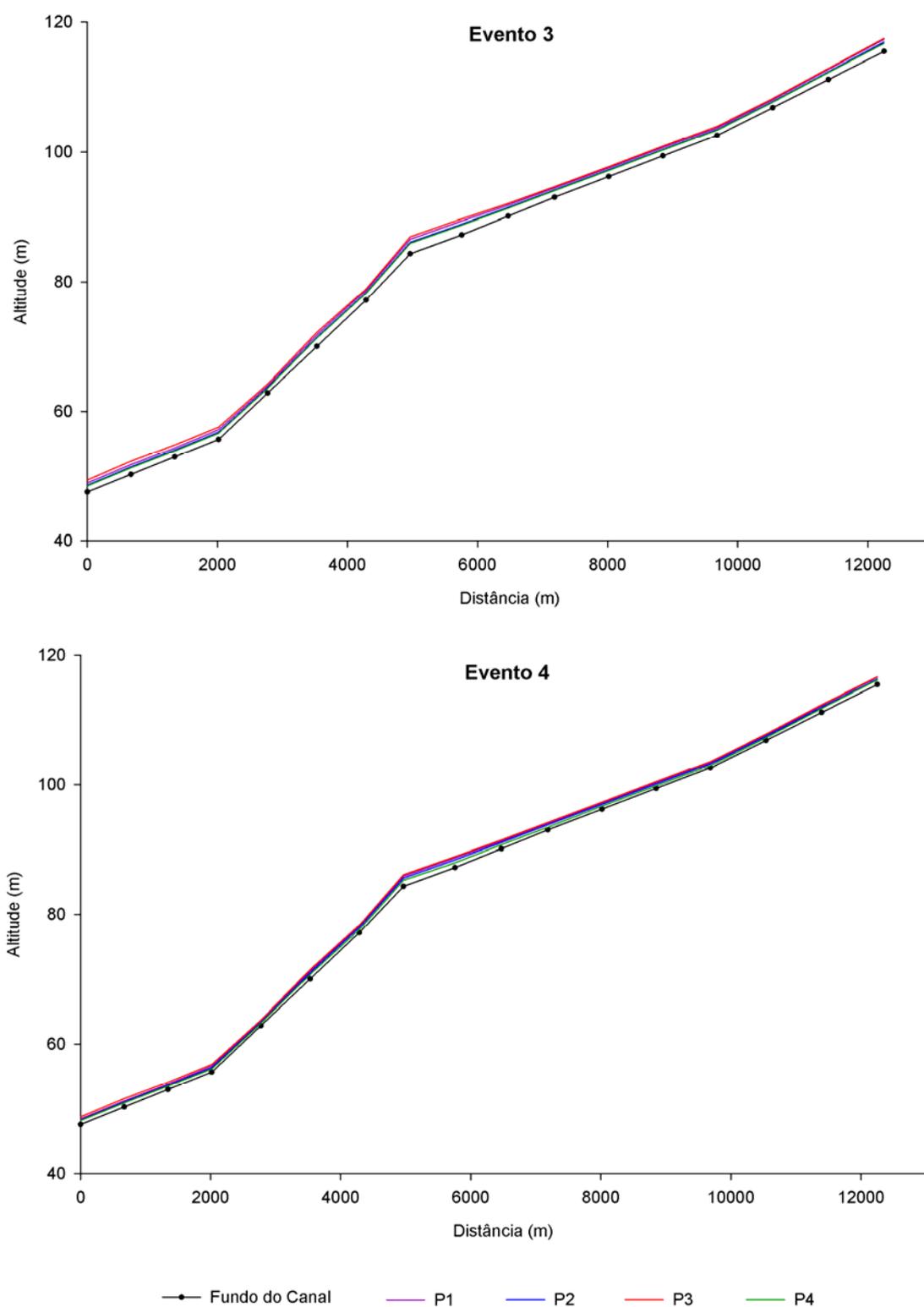


Figura 2B – Perfil longitudinal da linha d'água resultantes dos eventos 3 e 4 empregado as propostas geomorfológicas.

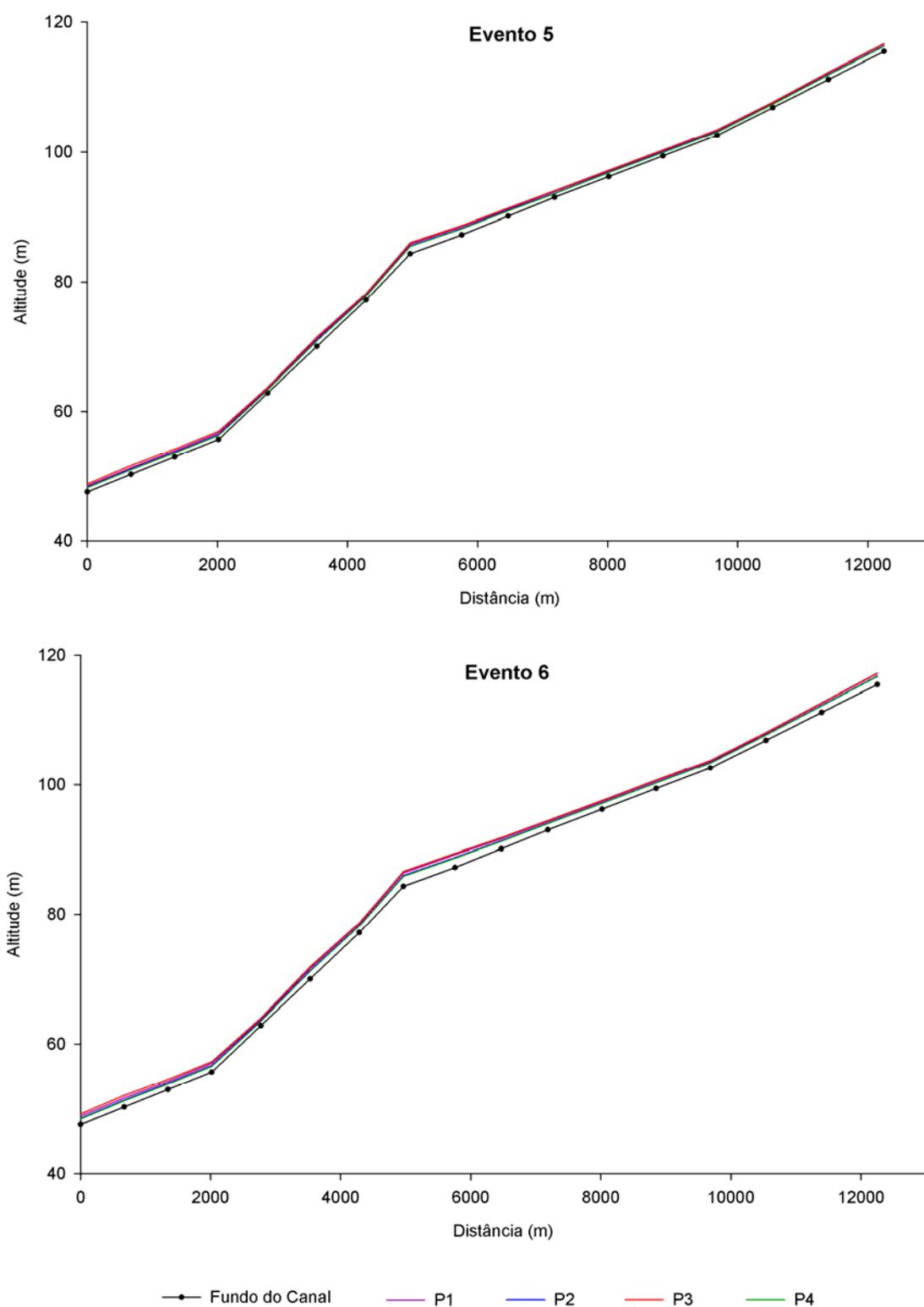


Figura 3B – Perfil longitudinal da linha d'água resultantes dos eventos 5 e 6 empregado as propostas geomorfológicas.

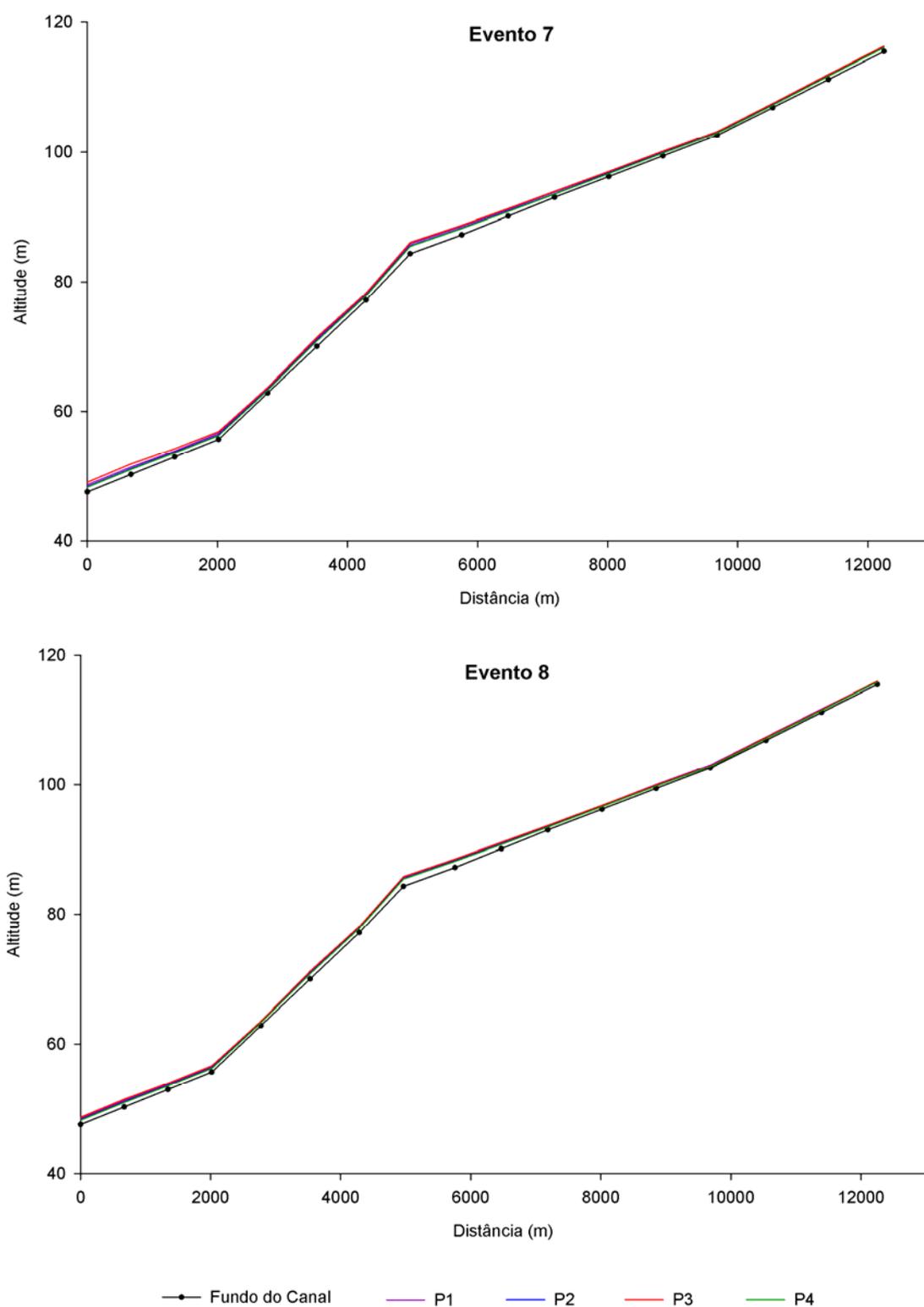


Figura 4B – Perfil longitudinal da linha d'água resultantes dos eventos 7 e 8 empregado as propostas geomorfológicas.

Apêndice C – Simulações das cotas

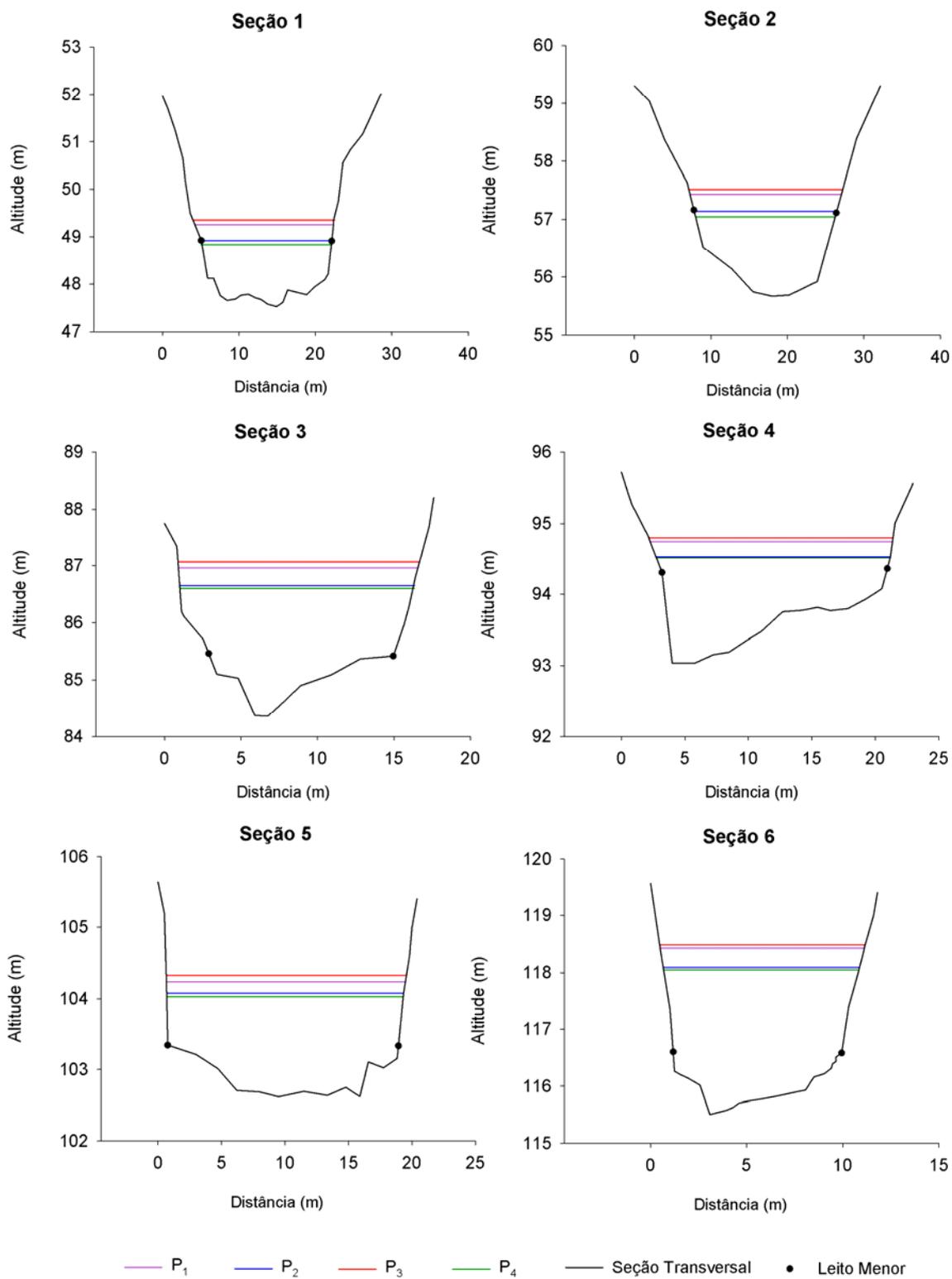


Figura 1C – Simulação das cotas referente ao evento 1 para cada seção transversal aplicando as propostas geomorfológicas.

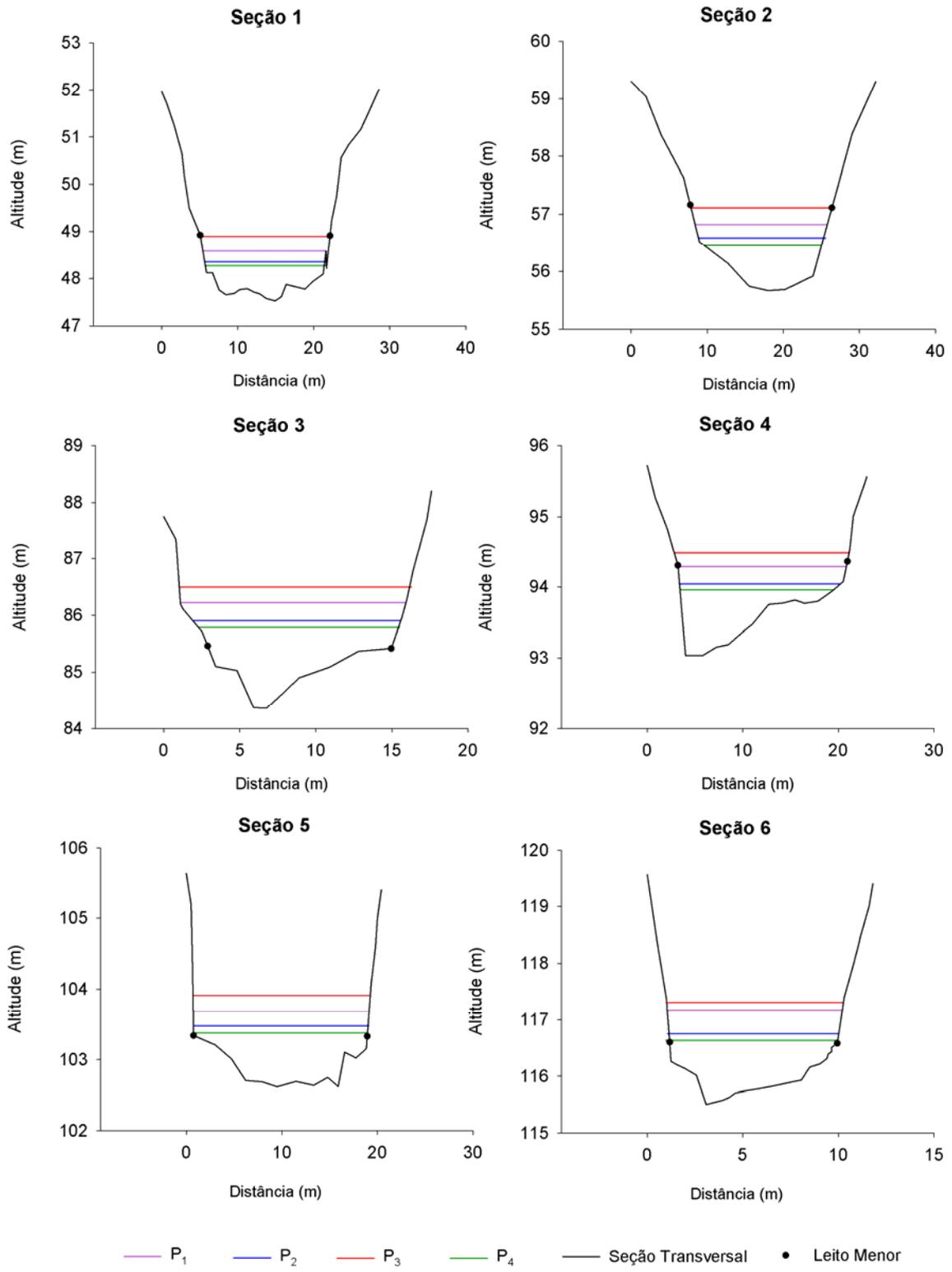


Figura 2C – Simulação das cotas referente ao evento 2 para cada seção transversal aplicando as propostas geomorfológicas.

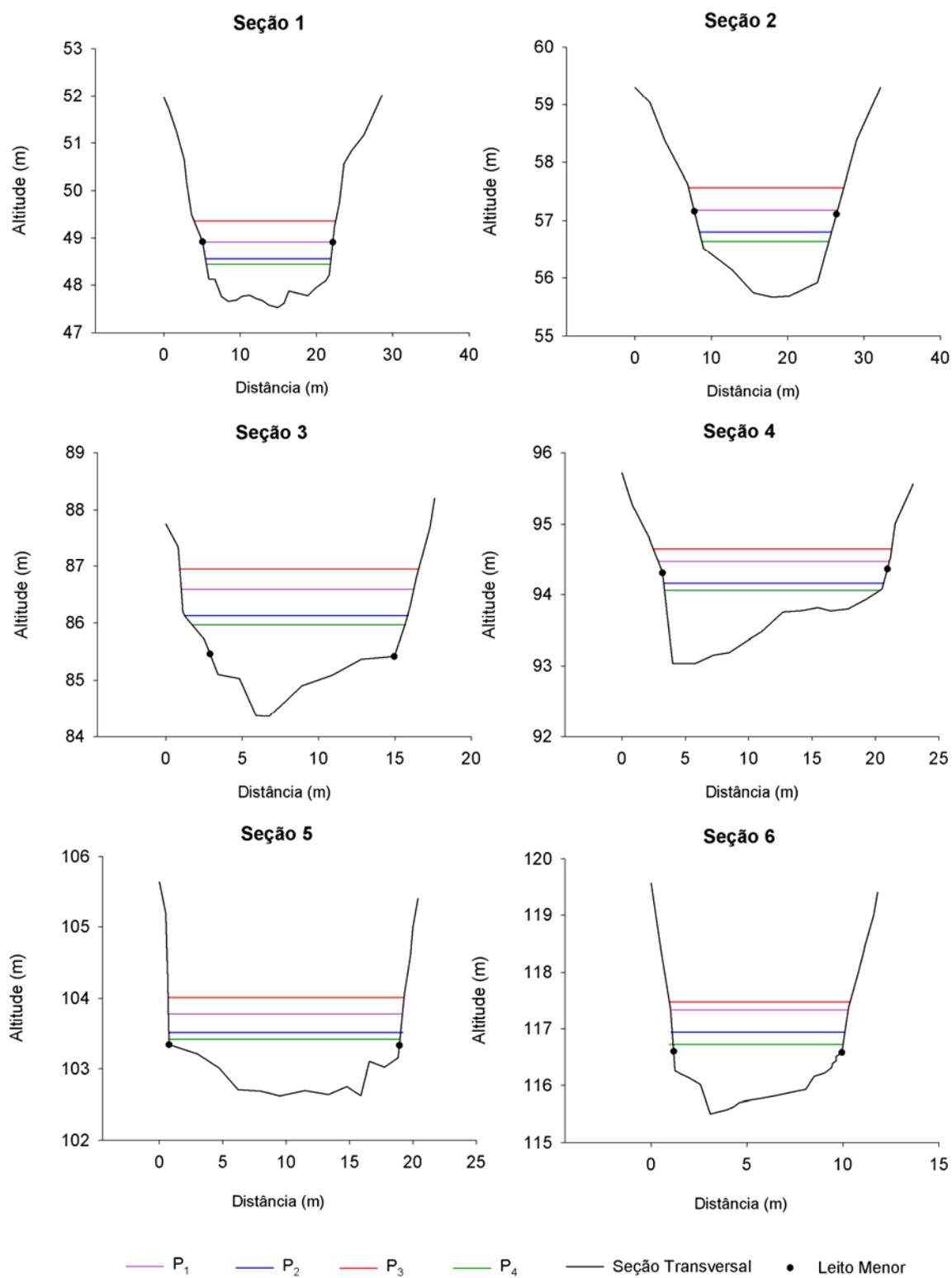


Figura 3C – Simulação das cotas referente ao evento 3 para cada seção transversal aplicando as propostas geomorfológicas.

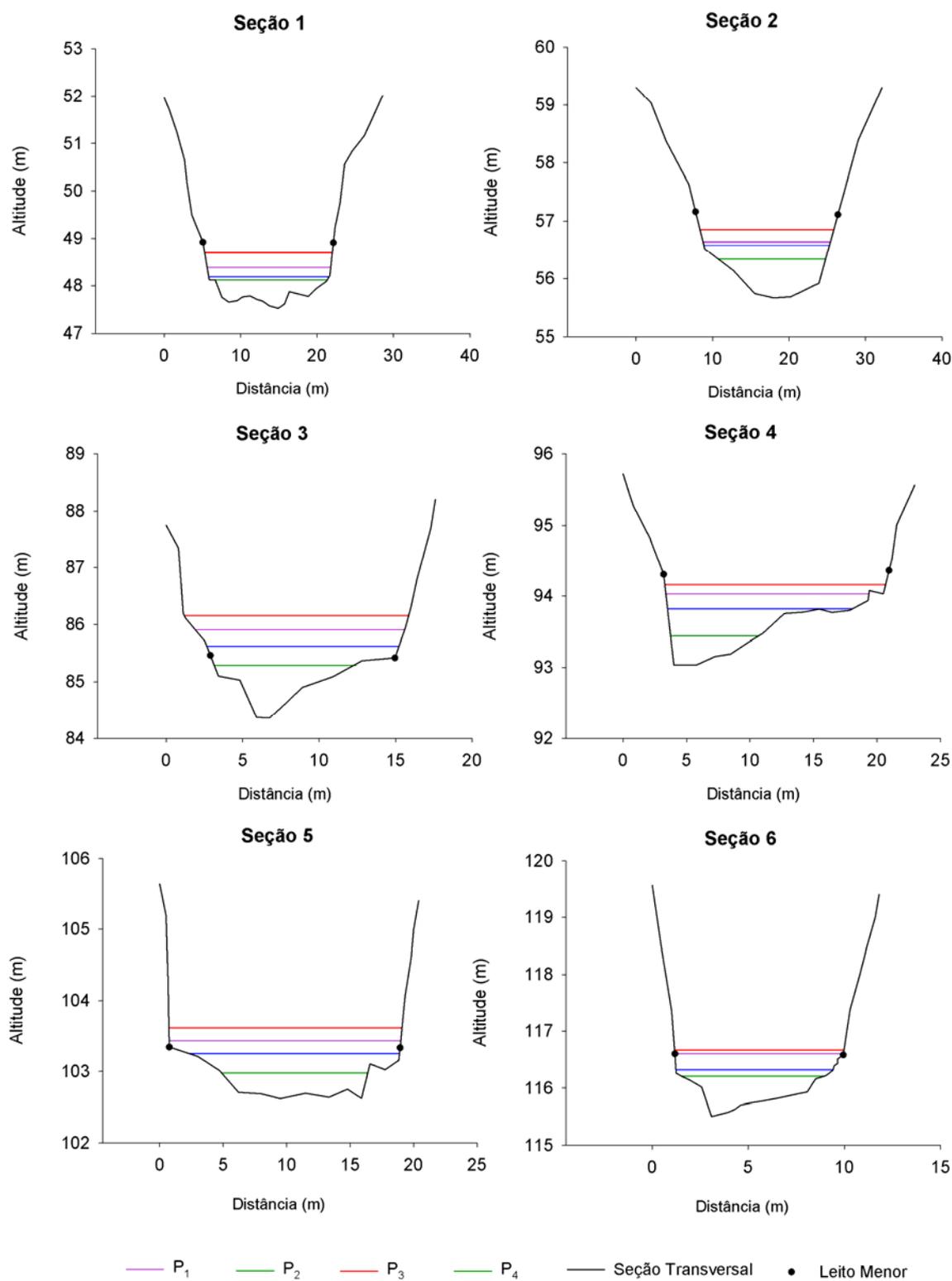


Figura 4C – Simulação das cotas referente ao evento 4 para cada seção transversal aplicando as propostas geomorfológicas.

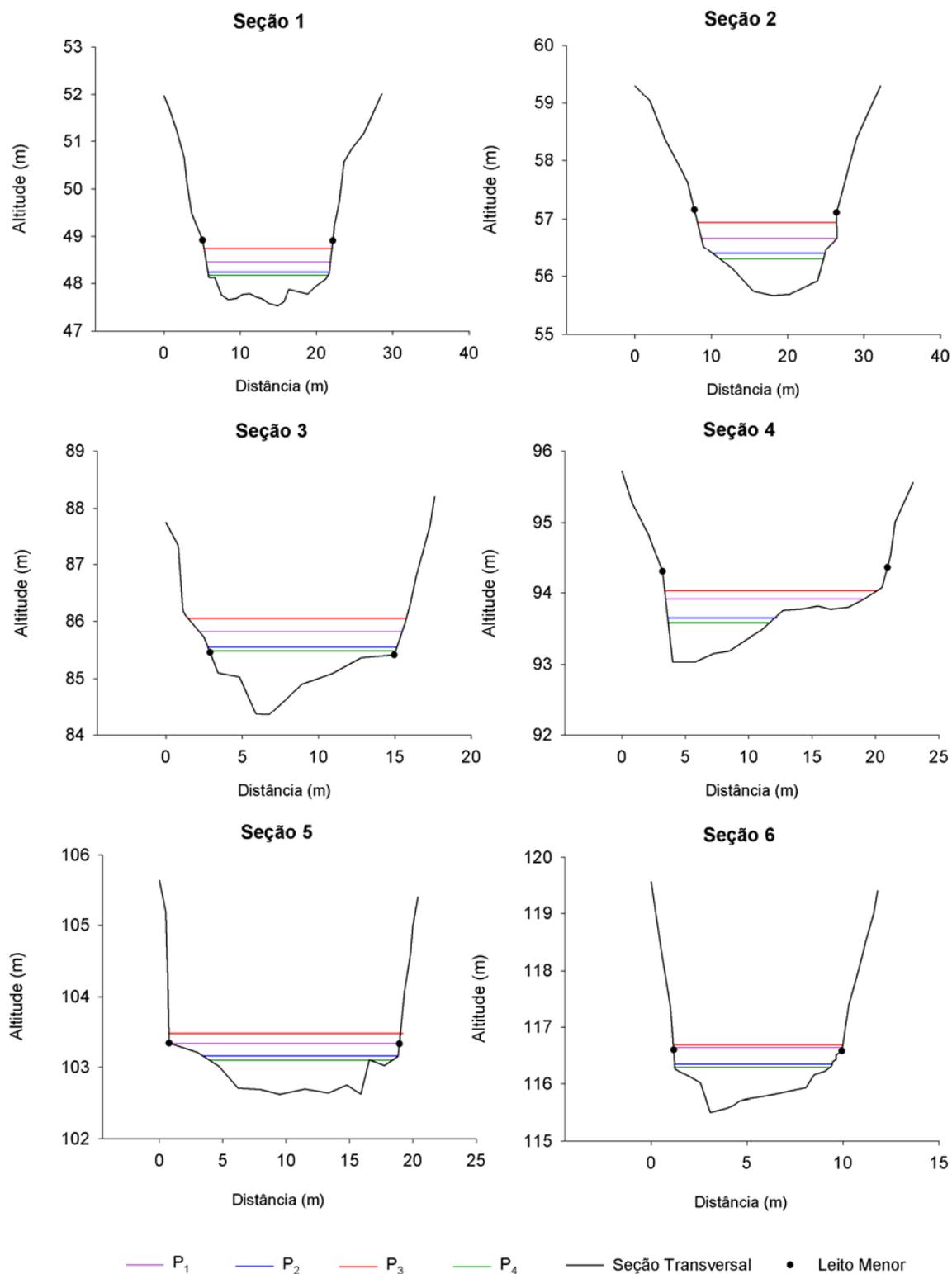
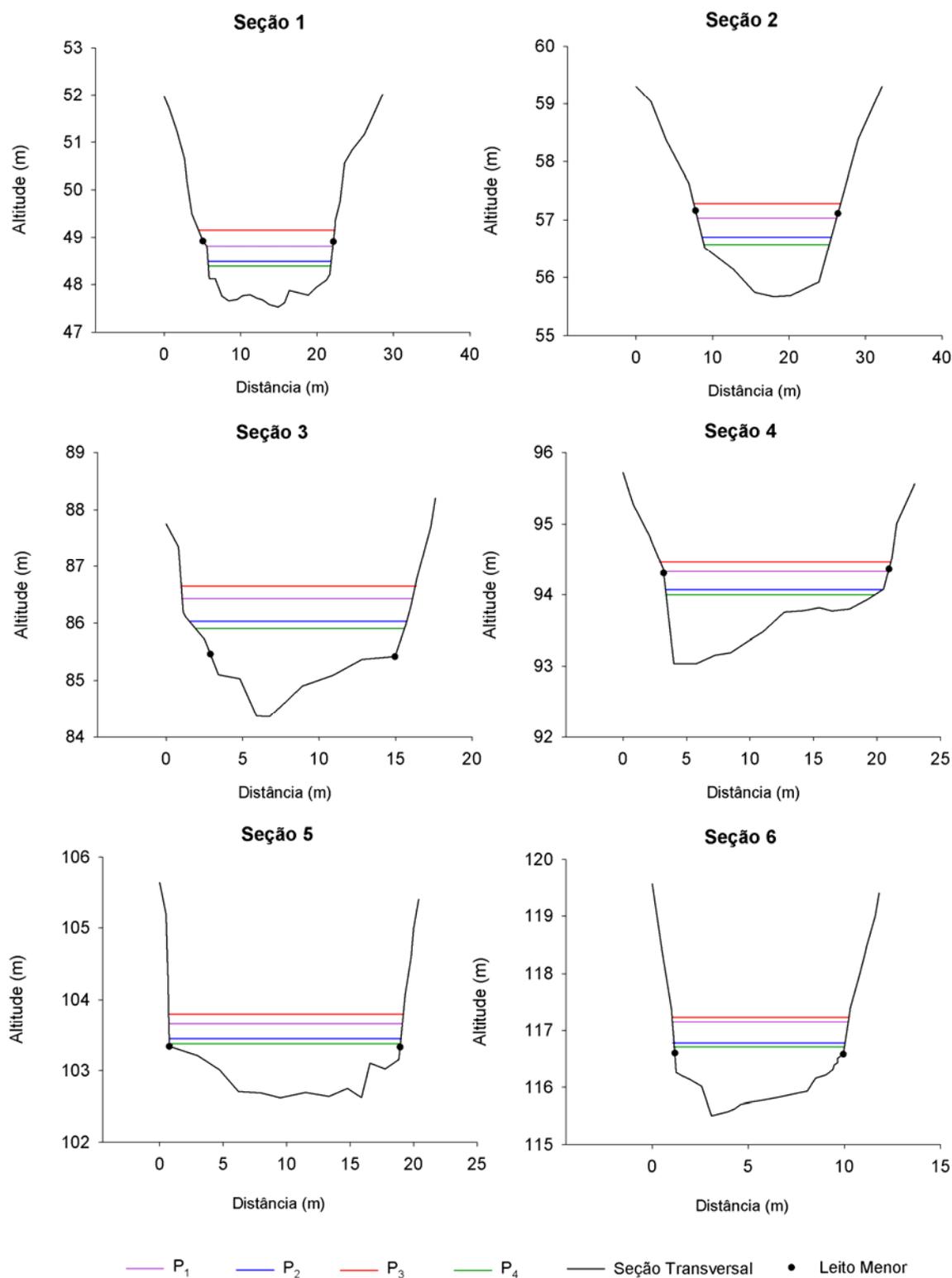


Figura 5C – Simulação das cotas referente ao evento 5 para cada seção transversal aplicando as propostas geomorfológicas.

Figura 6C – Simulação das cotas referente ao evento 6 para cada seção transversal aplicando as propostas geomorfológicas.



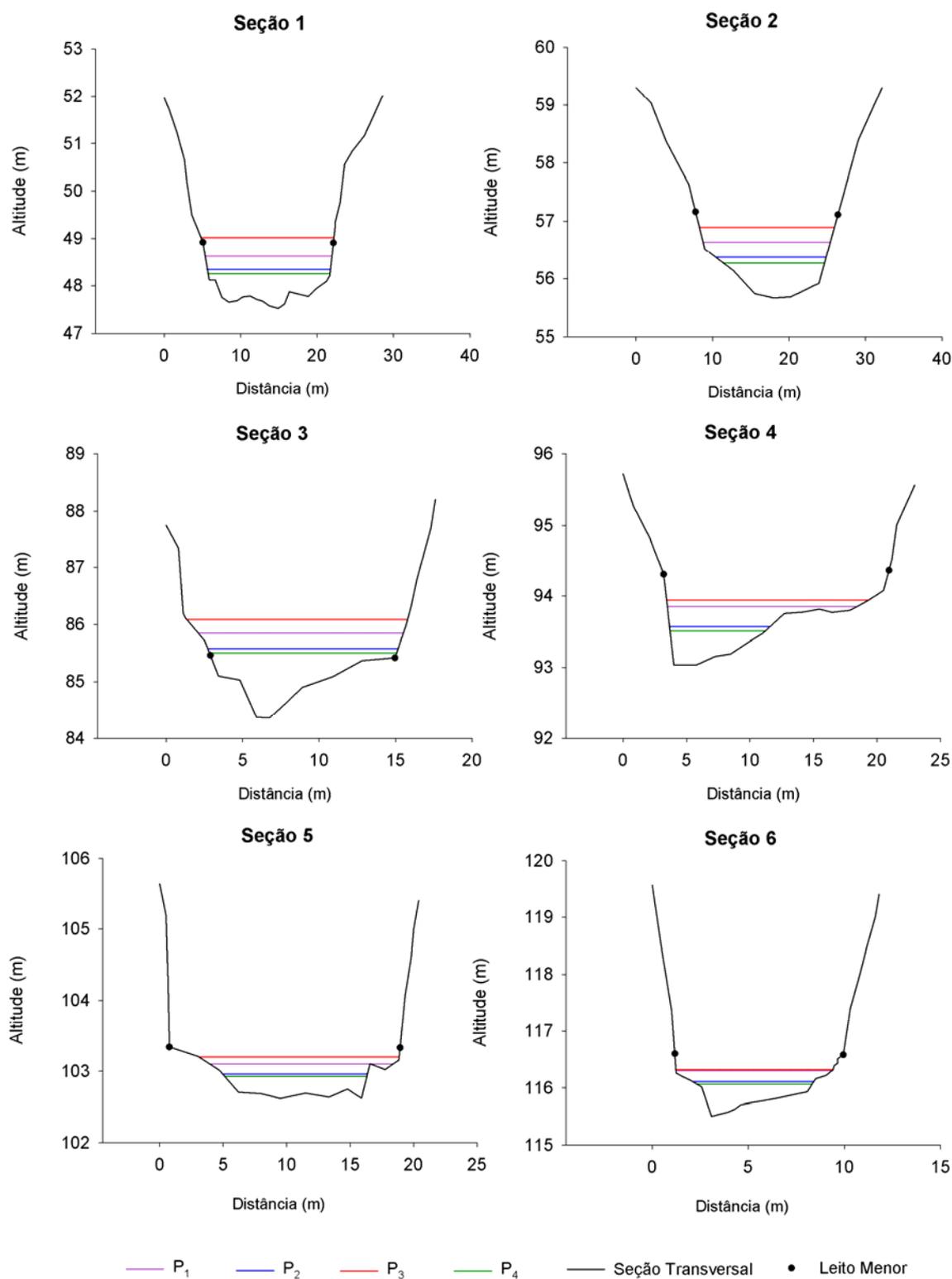


Figura 7C – Simulação das cotas referente ao evento 7 para cada seção transversal aplicando as propostas geomorfológicas.

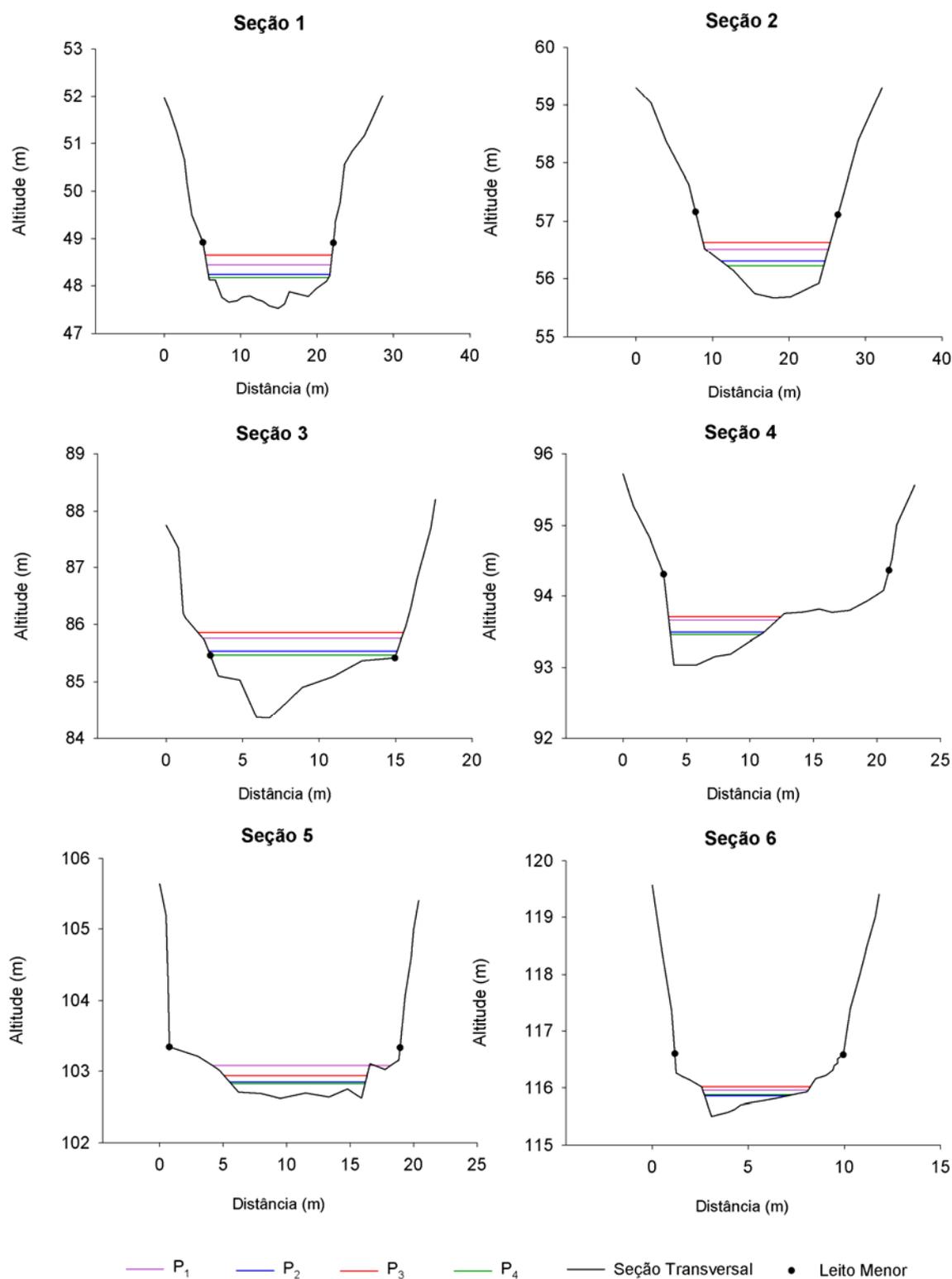


Figura 8C – Simulação das cotas referente ao evento 8 para cada seção transversal aplicando as propostas geomorfológicas.