

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RENAN DA ROSA SOUZA

**APLICAÇÃO DO HEC-HMS PARA SIMULAÇÃO DE VAZÕES NA BACIA DO RIO
TAQUARI**

São Leopoldo
2019

RENAN DA ROSA SOUZA

**APLICAÇÃO DO HEC-HMS PARA SIMULAÇÃO DE VAZÕES NA BACIA DO RIO
TAQUARI**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil, pelo Curso de
Engenharia Civil da Universidade do Vale
do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientadora: Prof.^a Ms. Eliane Conterato

São Leopoldo

2019

Aos meus pais, Carlos Alberto e Rosangélica, pela educação e ensinamentos que lhe atribuíram a mim, no qual tiveram papel fundamental na minha formação pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por estar sempre me guiando ao caminho certo e de me oportunizar a vivenciar todas essas experiências encontradas ao longo da minha graduação, mesmo em meio a tantas dificuldades.

A minha família, que foi o suporte principal a estar sempre me apoiando e a nunca me fazer desistir dos meus sonhos e objetivos, estando em todos os momentos acreditando que eu me tornaria um engenheiro civil. Agradecer também pela compreensão nas ocasiões em que me fiz ausente, em especial aos meus pais Carlos Alberto e Rosangélica.

Aos colegas que fiz ao longo do curso, pelo qual na maioria viraram em grandes amizades. Aos amigos de outros cursos e de fora da universidade que estiveram presentes durante o meu dia a dia, proporcionando instantes de risadas, desconstruções e cumplicidade.

A minha orientadora, Eliane Conterato, pela sua transmissão de conhecimento e paciência em todas as horas empregadas comigo durante a realização deste trabalho, assim como por acreditar na conclusão do mesmo, contribuindo com muito discernimento nas tomadas de decisões, organização e recomendações que enriqueceram consideravelmente esta pesquisa.

A toda a equipe da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, que se dispuseram em fornecer os dados necessários no desenvolvimento do estudo. Ao Franco Buffon, pela sua atenção e disponibilidade aos auxílios empenhados em esclarecimento de dúvidas e aprendizado com as ferramentas computacionais utilizadas. Ao colega e amigo Guilherme Querotti pelo também fornecimento de dados, através da empresa Agrosig.

E a todos os professores da graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, pelos conhecimentos repassados durante o período de formação acadêmica.

“Pessoas de sucesso fazem o que pessoas mal sucedidas não querem fazer.
Não queira que a vida seja mais fácil. Deseje que você seja ainda melhor.”

Jim Rohn

RESUMO

Atualmente, as inundações vem se apresentando como um dos grandes problemas enfrentados pela sociedade em áreas ribeirinhas e até mesmo em centros urbanos. Com o passar dos anos houve um aumento significativo da taxa de ocupação e uso do solo, atribuído às atividades relacionadas ao desenvolvimento da sociedade, que por sua vez reduziram o grau de permeabilidade das áreas ocupadas, aumentando a geração de escoamento superficial. Em áreas densamente ocupadas, torna-se imprescindível que um bom planejamento urbano, através de planos diretores, código de obras e ações governamentais, desenvolva um melhor desempenho frente ao controle dos espaços, bem como na mitigação de desastres devidos à eventos hidrológicos. Verificando estes aspectos e com a finalidade de estudar o escoamento superficial, o presente trabalho se constitui em uma avaliação das vazões geradas na bacia do Rio Taquari para o município de Estrela, mediante simulações hidrológicas realizadas na aplicação do software HEC-HMS. São comparados resultados obtidos através dos modelos concentrado e semi-distribuído com valores monitorados, afim de atingir uma melhor precisão de calibragem do modelo. Conclui-se que as vazões simuladas nos hidrogramas apresentam coerência com os valores observados, demonstrando bons ajustes nas curvas, especialmente no modelo concentrado, atingindo as maiores eficiências, com coeficientes na maioria superiores a 90%. Além disso, a simulação constatou pequenos intervalos de tempo do instante da vazão máxima, o que torna uma ação essencial para os sistemas de alerta nas tomadas de decisões ao avaliar com maior certeza o momento em que ocorre o pico de escoamento e as chances de proporcionar um evento de cheia, validando assim, a utilização deste tipo de simulação nas prevenções de inundação.

Palavras-chave: Eventos hidrológicos. Escoamento superficial. Simulações Hidrológicas. HEC-HMS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da urbanização em âmbito nacional e internacional	16
Figura 2 – Modificações na paisagem e hidrografia em decorrência da urbanização	18
Figura 3 – Mortos em função do tipo de desastre	19
Figura 4 – Comparativo de incidentes entre décadas	19
Figura 5 – Enchente no bairro Americana em Alvorada/RS no ano de 2013	20
Figura 6 – Aumento do nível de água de um rio por consequência das chuvas, ilustrando uma situação normal, de enchente e de incidência de inundação	22
Figura 7 – Fluxograma de medidas mitigadoras	24
Figura 8 – Parque dos Dick	25
Figura 9 – Inundação no município de Estrela/RS	26
Figura 10 – Discretização de bacias hidrológicas	29
Figura 11 – Forma esquemática do Hidrograma Sintético Triangular	36
Figura 12 – Fluxograma de planejamento da pesquisa	46
Figura 13 – Mapa de localização da área de estudo	47
Figura 14 – MDE com as bacias de interesse	49
Figura 15 – Tipos de solo na bacia do Rio Taquari	55
Figura 16 – Usos do solo na bacia do Rio Taquari	56
Figura 17 – Pontos das estações hidrológicas na bacia de estudo do Rio Taquari ..	58
Figura 18 – Elementos hidrológicos da bacia no modelo concentrado	59
Figura 19 – Elementos hidrológicos da bacia no modelo semi-distribuído	60
Figura 20 – Eventos selecionados para simulação de vazões no HEC-HMS	61
Figura 21 – Valores de CN na bacia do Rio Taquari	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Perfil longitudinal do talvegue principal da bacia P3 para modelo concentrado.....	50
Gráfico 2 – Perfil longitudinal do talvegue principal da bacia P1 para modelo semi-distribuído.....	51
Gráfico 3 – Perfil longitudinal do talvegue principal da bacia P2 para modelo semi-distribuído.....	51
Gráfico 4 – Perfil longitudinal do talvegue principal da bacia P3 para modelo semi-distribuído.....	52
Gráfico 5 – Hidrograma do evento 1 para modelo concentrado.....	67
Gráfico 6 – Hidrograma do evento 2 para modelo concentrado.....	67
Gráfico 7 – Hidrograma do evento 3 para modelo concentrado.....	68
Gráfico 8 – Hidrograma do evento 4 para modelo concentrado.....	68
Gráfico 9 – Níveis d'água do evento 1 para modelo concentrado.....	71
Gráfico 10 – Níveis d'água do evento 2 para modelo concentrado.....	71
Gráfico 11 – Níveis d'água do evento 3 para modelo concentrado.....	72
Gráfico 12 – Níveis d'água do evento 4 para modelo concentrado.....	72
Gráfico 13 – Hidrograma do evento 1 para modelo semi-distribuído.....	76
Gráfico 14 – Hidrograma do evento 2 para modelo semi-distribuído.....	76
Gráfico 15 – Hidrograma do evento 3 para modelo semi-distribuído.....	77
Gráfico 16 – Hidrograma do evento 4 para modelo semi-distribuído.....	77
Gráfico 17 – Níveis d'água do evento 1 para modelo semi-distribuído.....	79
Gráfico 18 – Níveis d'água do evento 2 para modelo semi-distribuído.....	79
Gráfico 19 – Níveis d'água do evento 3 para modelo semi-distribuído.....	80
Gráfico 20 – Níveis d'água do evento 4 para modelo semi-distribuído.....	80
Gráfico 21 – Comparativo das vazões de pico simuladas e observadas.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Causas e consequências decorrentes da urbanização	17
Tabela 2 – Métodos aplicados para a simulação de precipitação em escoamento...	30
Tabela 3 – Grupo e características do solo	33
Tabela 4 – Valores de CN para bacias urbanas.....	33
Tabela 5 – Valores de CN para bacias rurais.....	34
Tabela 6 – Coeficientes de escoamento superficial com base em superfícies	40
Tabela 7 – Coeficientes de rugosidade de Manning	44
Tabela 8 – Índices fisiográficos das bacias de interesse.....	50
Tabela 9 – Valores de CN em função do uso e tipo de solo	53
Tabela 10 – Tipos de solo presente na bacia Taquari-Antas	54
Tabela 11 – Classes de uso do solo presente na bacia Taquari-Antas.....	55
Tabela 12 – Curva-chave utilizada	57
Tabela 13 – Dados das estações hidrológicas	57
Tabela 14 – Classificação do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe	62
Tabela 15 – Correção dos valores de CN	64
Tabela 16 – Valores de CN calibrados para o modelo concentrado	65
Tabela 17 – Diferenças no tempo de concentração para o modelo concentrado.....	66
Tabela 18 – Resultados obtidos nos hidrogramas para o modelo concentrado	69
Tabela 19 – Valores de CN calibrados para o modelo semi-distribuído	74
Tabela 20 – Diferenças no tempo de concentração para o modelo semi-distribuído	75
Tabela 21 – Resultados obtidos nos hidrogramas para o modelo semi-distribuído ..	78

LISTA DE SIGLAS

ARCGIS	Software para Sistemas de Informações Geográficas
CEPED	Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil
CN	Número da Curva
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental
HEC-DSS	<i>Hydrologic Engineering Center - Data Storage System</i>
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System</i>
HUT	Hidrograma Unitário Triangular
IDF	Intensidade Duração e Frequência
MDE	Modelo Digital de Elevação
NRCS	Serviço de Conservação de Recursos Naturais
ONG	Organização Não Governamental
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	12
1.1 Tema	14
1.2 Delimitação do Tema	14
1.3 Problema	14
1.4 Objetivos	14
1.4.1 Objetivo Geral	14
1.4.2 Objetivos Específicos	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Eventos hidrológicos e impactos associados	16
2.1.1 Enchente e inundação	21
2.1.2 Enxurrada e alagamento	22
2.1.3 Medidas mitigadoras.....	23
2.2 Modelos de transformação chuva-vazão.....	26
2.2.1 Método do SCS	31
2.2.2 Método Racional.....	38
2.3 Modelos de propagação de escoamento.....	41
2.3.1 Modelo da Onda Cinemática	42
2.3.2 Modelo Muskingum-Cunge.....	43
2.4 HEC-HMS.....	44
3 METODOLOGIA	46
3.1 Características da área de estudo.....	46
3.1.1 Delimitação das sub-bacias nos pontos de interesse	48
3.1.2 Processamento dos índices fisiográficos.....	49
3.1.3 Mapas de tipo e uso do solo.....	54
3.2 Seleção e consistência dos dados hidrológicos	56
3.3 Especificações dos parâmetros de entrada para o modelo	59
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	63
4.1 Determinação do CN	63
4.2 Calibração e simulação do HEC-HMS para o modelo concentrado	64
4.3 Calibração e simulação do HEC-HMS para o modelo semi-distribuído.....	73
4.4 Comparação de resultados dos modelos.....	81
5 CONCLUSÃO	83

6 SUGESTÕES	85
REFERÊNCIAS.....	86
APÊNDICE A – SÉRIES PLUVIOMÉTRICAS DAS ESTAÇÕES DISTRIBUÍDAS PELA BACIA	91
APÊNDICE B – APLICAÇÃO DOS MODELOS DE TRANSFORMAÇÃO CHUVA-VAZÃO E DE PROPAGAÇÃO DE ESCOAMENTO.....	95
APÊNDICE C – HIDROGRAMAS SIMULADOS NAS ESTAÇÕES DE MUÇUM E ENCANTADO PARA MODELO SEMI-DISTRIBUÍDO	96
ANEXO A – SEÇÕES TRANSVERSAIS DO RIO TAQUARI PARA OS MUNICÍPIOS DE ESTRELA E ENCANTADO	100

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A água sempre foi uma importante fonte de sobrevivência e desenvolvimento humano à nível global. Em bacias hidrográficas, além da presença de solo e vegetação, predomina-se também vários cursos d'água como rios, córregos ou arroios, por onde, na maioria das regiões, são essenciais para a renda e desenvolvimento da população.

O estudo do escoamento superficial é importante para tomadas de decisões em diferentes campos da Engenharia. Por exemplo, ao determinar o escoamento de um determinado curso d'água, podemos prever como será a disponibilidade hídrica do local além do comportamento futuro em relação aos níveis de elevação, o que é primordial nos projetos para a construção de estradas, pontes, usinas hidrelétricas, barragens e outras estruturas. Na bacia do Rio Taquari, além da tipologia de solo presente, o regime de chuvas também traz consigo inúmeros benefícios à região, de modo a torná-la um ótimo território para produção de alimentos, alavancando ainda mais a economia. Porém, além dos benefícios, muitos problemas são enfrentados em decorrência da intensidade e frequência das precipitações. Desse modo, a previsão hidrológica e a utilização de modelagem na simulação de eventos extremos, surgem como boas ferramentas aos sistemas de alerta na possibilidade de atuação e precaução frente a população e aos cenários de enchente e inundação.

Muitos fatores são levados em consideração quando se aborda o ciclo hidrológico. Variáveis como precipitação, interceptação vegetal, infiltração, percolação da água no solo e evapotranspiração, influenciam diretamente na simulação de vazões em um rio ao se aplicar estes dados num sistema de modelagem hidrológica (KOBAYAMA, 2009).

Contudo, essas informações nem sempre são disponibilizadas na quantidade e qualidade necessária para realização de estudos. No Brasil, várias localidades não possuem um esquema de monitoramento eficiente que possa apresentar registros confiáveis (BERTONI e TUCCI, 1993). Em decorrência da escassez de dados, a precisão da calibragem dos modelos hidrológicos acaba se tornando, em alguns casos, insuficiente ao se reproduzir um determinado cenário real. Sendo assim, a participação governamental, em conjunto com a engenharia, vem sendo substancial

ao promover investimentos na área ambiental, visando a implantação de novas tecnologias para a diminuição do agravamento causado por eventos hidrológicos.

O Rio Taquari e seus afluentes abrangem diversas cidades do estado do Rio Grande do Sul, compondo a malha hidrográfica da bacia Taquari-Antas. Muitas áreas banhadas por este rio acabam sofrendo os impactos de inundação, prejudicando principalmente a locomoção, moradia e agricultura.

Essa realidade social tem-se percebido nos últimos anos com bastante frequência, pois o crescimento populacional desencadeou um alto descontrole com a taxa de uso e ocupação do solo. Além da chuva como fator atuante, a impermeabilidade do solo tornou-se um aspecto significativo para retratar esses acontecimentos. Todavia, na maioria das vezes, os maiores danos causados por eventos hidrológicos se dão para aquelas pessoas que ocupam espaços irregulares, estabelecidas em regiões ribeirinhas e com forte predominância de inundações.

Alternativas para a minimização dos impactos ainda vem sendo elaboradas e implementadas através do conhecimento sobre o comportamento do escoamento das bacias. Visando proporcionar uma melhor qualidade de vida da população e cuidado com o meio ambiente, a aplicação de medidas mitigadoras frente aos problemas enfrentados são uma boa forma de precaução, justificando assim, a grande necessidade desses estudos, pesquisas e investimentos por parte dos órgãos públicos.

Desta forma, o presente trabalho propõe uma análise das vazões geradas na bacia do Rio Taquari para o município de Estrela, aplicadas aos modelos concentrado e semi-distribuído com o auxílio do software HEC-HMS. Utilizando-se de uma base de dados e parâmetros adaptados à referida região, este trabalho, além de simular as vazões, poderá consistir numa continuação para posteriores estudos ambientais e de planejamento.

1.1 Tema

O tema deste trabalho é a análise de vazões na bacia do Rio Taquari, direcionado à minimizações de impactos e prejuízos provocados por inundações.

1.2 Delimitação do Tema

O trabalho delimita-se a uma análise das vazões geradas em trecho do Rio Taquari, na região do município de Estrela/RS no Vale do Taquari, em quatro eventos utilizando o software HEC-HMS.

1.3 Problema

Um dos grandes problemas ambientais enfrentados frequentemente em várias regiões do estado, mais precisamente no Vale do Taquari, são as inundações. Devido a magnitude com que estes eventos ocorrem, causando prejuízos em grande escala e afetando diretamente vários municípios, surge a necessidade de implantações de medidas mitigadoras, afim de justamente minimizar os impactos gerados como, por exemplo, o monitoramento e atuação dos sistemas de alerta.

Por diversas vezes a população local é atingida por inundações, havendo a inevitável ação da Defesa Civil para retirada de famílias abrigadas em áreas de risco. Além da moradia como aspecto associado, problemas relacionados à locomoção e agricultura também são fortemente afetados, tanto na locomoção de pessoas e tráfego de veículos, quanto nas lavouras de alimentos perdidas por ficar totalmente submersas na água, o que de fato acaba prejudicando não só os produtores, mas como a economia da região.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar as vazões geradas na bacia do Rio Taquari para o município de Estrela através da simulação no software HEC-HMS.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) caracterizar a área de estudo, buscando identificar aspectos como tipo e uso do solo, topografia e clima predominante na região;
- b) realizar o levantamento da base de dados hidrológicos na bacia do Rio Taquari;
- c) executar a simulação das vazões com o HEC-HMS considerando o modelo concentrado e semi-distribuído;
- d) comparar os valores obtidos nos dois modelos.

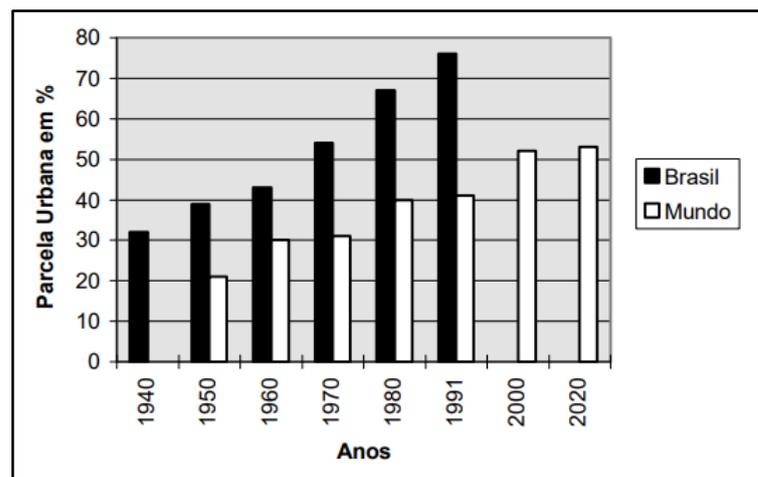
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordadas questões relativas aos conceitos e características dos eventos hidrológicos ocorrentes com maior frequência no Brasil, relatando as suas principais causas e impactos, junto aos prejuízos frente a população e à natureza, evidenciando além disso, aspectos relacionados a modelagem hidrológica, relação chuva-vazão, métodos para simulação de precipitação e escoamento, bem como o uso de programa computacional na aplicação destes modelos.

2.1 Eventos hidrológicos e impactos associados

No Brasil, o crescimento populacional vem aumentando significativamente desde a década de 1960 ao longo de todo o país (Figura 1). Juntamente com esse desordenado crescimento, principalmente em regiões metropolitanas, a elevada densidade urbana acarreta vários prejuízos socioeconômicos, humanos e ambientais, devido a remoção de cobertura vegetal e da impermeabilização dos solos. Estes fatores propiciam o aumento no escoamento superficial (BOLDRIN, 2005).

Figura 1 – Evolução da urbanização em âmbito nacional e internacional



Fonte: Mega-cities apud (TUCCI, 1997).

O acúmulo das águas geradas nas cidades são transtornos que atrapalham não somente a mobilidade urbana e qualidade de vida das pessoas, mas também

podem causar sérios riscos à saúde da população. Em função da falta de maiores investimentos em infraestrutura e saneamento básico por parte dos órgãos públicos, a associação de alguns problemas de drenagem e esgoto quando ocorrem alagamentos, torna-se um fator de perigo as pessoas, devido a maioria dos córregos serem verdadeiros meios de contaminação com o transporte de lixo e esgotos a céu aberto. Por conta disso, fica evidente que um desenvolvimento urbano sem planejamento e controle ambiental, só acarretará em prejuízos frente a sociedade (TUCCI, 1997).

Para melhor compreensão dos efeitos da urbanização, pode-se observar a tabela a seguir, adaptada de Bollmann (2003), que apresenta as causas e os impactos causados por algumas ações decorrentes desse processo.

Tabela 1 – Causas e consequências decorrentes da urbanização

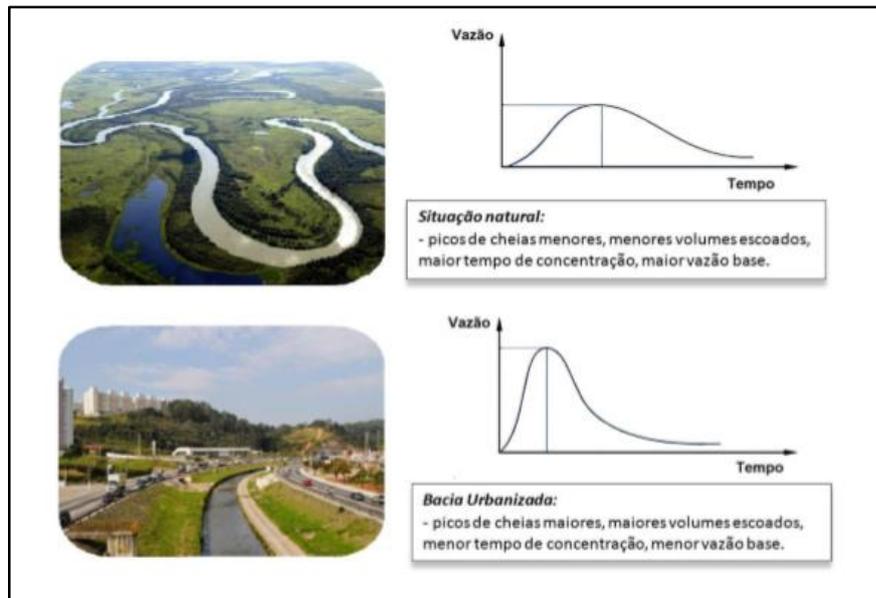
CAUSAS	CONSEQUÊNCIAS (IMPACTOS)
Impermeabilização do solo	Maiores picos de cheia e vazão de rios.
Redes de drenagem	Maiores picos de cheia a jusante.
Lixo	Entupimento de bueiros e galerias pluviais.
Redes de esgotos deficientes	Degradação da qualidade da água e doenças de veiculação hídrica.
Desmatamento	Maiores picos de cheia, maiores erosões e assessoramento em canais e galerias.
Ocupação das várzeas	Maiores picos de cheia e maiores prejuízos ao patrimônio por inundações.

Fonte: Adaptado de (BOLLMANN, 2003).

Ainda conforme Bollmann (2003), tanto a impermeabilidade do solo quanto a ineficiência dos sistemas de drenagem juntamente com o acúmulo de lixo, são fatores que resultam numa maior velocidade das águas para jusante, elevando significativamente essas vazões e os picos de cheia.

A Figura 2 mostra as consequências da urbanização na paisagem e hidrografia de uma região, apresentando duas situações de determinadas bacias, sendo uma delas em situação natural e a outra urbanizada. Comparando os dois contextos, percebemos que a bacia com áreas edificadas e com menor predominância de vegetação, indica uma maior elevação nos picos de cheia, aumentando a disponibilidade de água e a sua velocidade no escoamento superficial, e diminuindo também o tempo de concentração em virtude da impermeabilização (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016).

Figura 2 – Modificações na paisagem e hidrografia em decorrência da urbanização



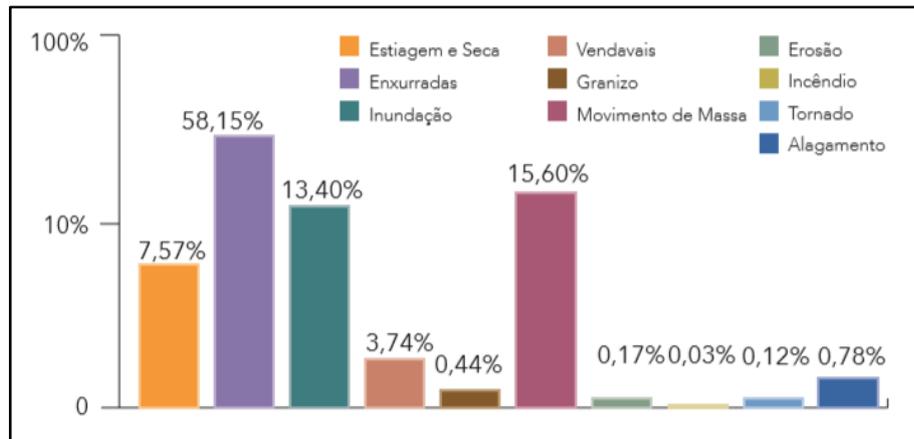
Fonte: Adaptado de (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016).

Os eventos hidrológicos são fenômenos naturais que podem ocorrer em grandes magnitudes e em várias áreas e regiões, através das alterações climáticas e por influência das ações humanas, causando enormes impactos sociais e ambientais. Dentre os eventos mais destacados estão os tornados, furacões, abalos sísmicos, vulcões e inundações (VESTENA, 2008).

Segundo Castro (2009), a quantificação de desastres e eventos extremos, é dada em termos de intensidade e magnitude respectivamente. Portanto, a intensidade de algum desastre irá depender da magnitude de determinado evento, através da interação entre o grau de vulnerabilidade do local afetado.

De acordo com os dados da CEPED (2013), os eventos que mais afetaram a população brasileira entre anos de 1991 a 2010, foram as estiagens e secas por serem essas mais frequentes e duradouras, seguidas também pelas enxurradas. Analisando a Figura 3, nota-se que os fenômenos de maiores magnitudes e altamente destrutivos como é o caso dos tornados, são os responsáveis por um número de mortes inferiores aos eventos mais recorrentes e menos catastróficos, citando como exemplos as enxurradas em 58,15% seguido dos movimentos de massa em 15,60%.

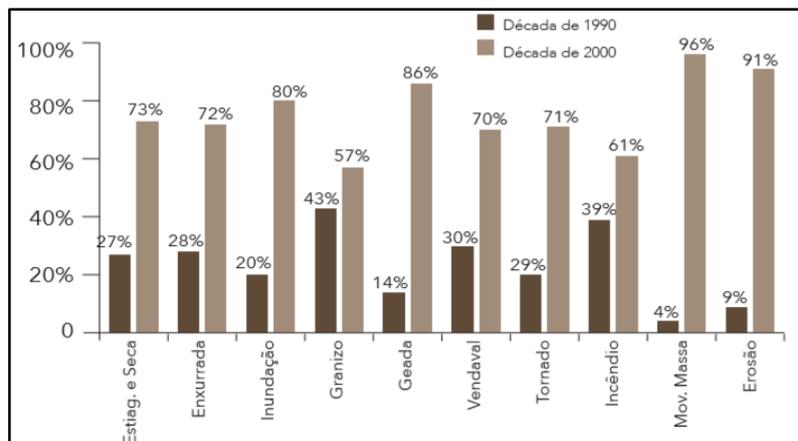
Figura 3 – Mortos em função do tipo de desastre



Fonte: (CEPED, 2013).

Conforme pode ser observado na Figura 4 e em seguimento de comparação, é apresentada a diferença de registros por tipo de catástrofe para as décadas de 1990 a 2000. Nesta análise, se verifica que ao longo desses dez anos e para cada década, houve um aumento significativo de ocorrências, atribuídas à poluição e aos maiores adensamentos urbanos (CEPED, 2013).

Figura 4 – Comparativo de incidentes entre décadas



Fonte: (CEPED, 2013).

O ser humano até o presente momento, ainda segue interferindo na natureza através de ações, realizando a implantação de novas construções e produções em empresas, no qual os impactos causados por elas são na maioria das vezes esquecidos ou até mesmo ignorados. Esses impactos, segundo Leopold (1968), podem ser separados em três tipos. O primeiro refere-se ao impacto na quantidade,

onde está relacionado no aumento da vazão de pico que uma cheia sofre em áreas que estão urbanizadas. Como já citados anteriormente, devido à baixa infiltração de água no solo, o escoamento superficial tende a aumentar, adquirindo maiores volumes e influenciando não somente os picos de vazão, mas sim, o escoamento da base de rios em épocas de seca, visto que a água disponível para a recarga subterrânea e renovação de umidade no solo sofrerá redução. A Figura 5, exemplifica um caso relacionado ao impacto na quantidade.

Figura 5 – Enchente no bairro Americana em Alvorada/RS no ano de 2013



Fonte: O Alvoradense (2013).

Ainda para o mesmo autor, o segundo aspecto trata-se do impacto na qualidade, ou seja, está relacionado com o aumento nos valores médios de parâmetros sobre a qualidade das águas pluviais em áreas urbanas. A água proveniente das precipitações quando em contato com os efluentes de esgotos, torna-se um agente de degradação aos corpos d'água. Dentre os poluentes, além da matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, hidrocarbonetos e metais são alguns dos elementos presentes em óleos, pneus e combustíveis de automóveis que contribuem de maneira geral para a poluição dos escoamentos em superfícies de estradas e calçadas (LEOPOLD, 1968). Já o terceiro e último aspecto, compreende a categoria impacto relativo ao valor ambiental, referente às fontes motivadoras para os danos causados ao meio ambiente em consequência da urbanização.

Neste referencial teórico e ainda para este mesmo tópico, serão analisados os conceitos e as características de enchente, inundação, alagamento e enxurrada, visto que todos eles são motivados pela água e acabam sendo muitas vezes confundidos entre si.

2.1.1 Enchente e inundação

Segundo Gontijo (2007), as enchentes são eventos temporários correspondentes à ocorrência de elevadas vazões em cursos d'água e em determinados períodos do ano. Elas ocorrem quando o nível de água se eleva sobre o rio aumentando o seu volume e ocupando uma área maior do que a sua capacidade de escoamento natural, causando assim, o transbordamento de seu canal principal. O motivo para esse fenômeno acontecer, é devido as fortes precipitações que caem sobre uma área em um intervalo de tempo curto ou devido ao excesso de precipitações que ocorrem com menor intensidade, porém em vários dias consecutivos.

As enchentes de acordo com Tucci (2001), podem ser caracterizadas em dois tipos, enchentes em relação a urbanização e em áreas ribeirinhas:

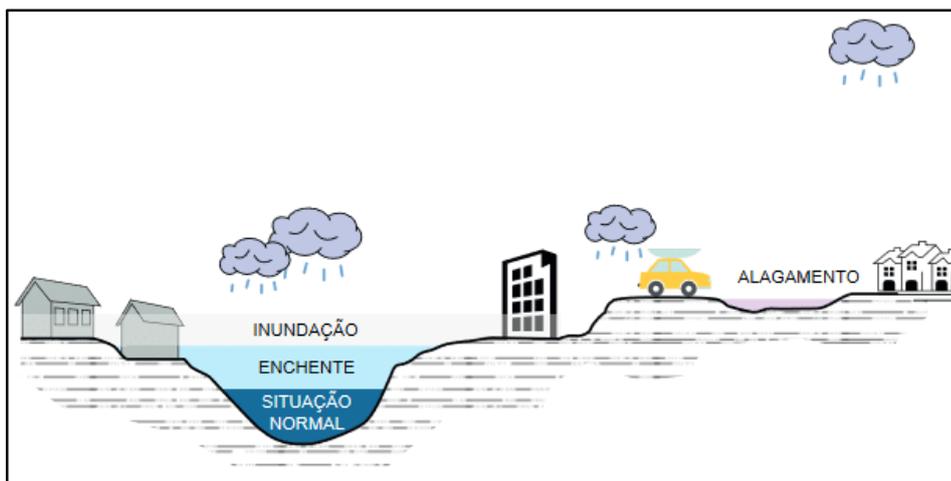
[...] a primeira é caracterizada pelo aumento de sua frequência e magnitude, devido à ocupação do solo com superfícies impermeáveis e rede de condutos de escoamentos. Adicionalmente, o desenvolvimento urbano pode produzir obstruções ao escoamento como aterros e pontes, drenagens inadequadas e obstruções ao escoamento junto a condutos e assoreamento. As enchentes em áreas ribeirinhas são naturais, atingindo a população que ocupa o leito maior dos rios. Essas enchentes ocorrem, principalmente, pelo processo natural no qual o rio ocupa o seu leito maior, de acordo com os eventos extremos, em média com tempo de retorno da ordem de 2 anos.

Semelhante às enchentes, Reckziegel (2007) destaca que as inundações também são fenômenos naturais definidos pela acentuada elevação do nível de água dos rios, havendo o extravasamento às suas margens de forma a alagar as planícies adjacentes e áreas inadequadas para ocupação, como construções de residências em áreas ribeirinhas. Elas também podem ser provocadas, devido ao excesso de chuvas ou a uma obstrução pela qual interrompa o caminho da vazão de água de uma enchente. Citando como exemplo, bueiros entupidos ou mal dimensionados.

Portanto, afim de diferenciá-las, podemos distinguir inundação como sendo o evento em que ocorre o transbordamento de água em um rio nas áreas de várzea, e

enchentes como o aumento da vazão no canal de drenagem, alcançando a sua cota máxima, porém sem haver o extravasamento. A Figura 6 a seguir, retrata bem essas duas situações (GONTIJO, 2007; RECKZIEGEL, 2007).

Figura 6 – Aumento do nível de água de um rio por consequência das chuvas, ilustrando uma situação normal, de enchente e de incidência de inundação



Fonte: Defesa Civil de São Bernardo do Campo/SP (2011).

2.1.2 Enxurrada e alagamento

Conforme Castro (2003), nomeia-se enxurrada como sendo o escoamento superficial caracterizado por um intenso volume de água e com altas velocidades e energia. Para o autor, suas ocorrências são devido as fortes precipitações que ocorrem em um período curto de tempo e quando ocorrem, acontecem de forma mais excessiva geralmente nas pequenas bacias, por onde o relevo seja mais acidentado.

Já o alagamento, é o acúmulo de água presente ao longo dos perímetros urbanos, gerados também por fortes precipitações e ineficiência dos sistemas de drenagem. Dentre alguns dos problemas causadores estão o mal dimensionamento dos dispositivos de escoamento que não dão conta de suportar as vazões da chuva, citando como exemplo: sarjetas, bocas de lobo e redes coletoras, além do entupimento destes sistemas de engenharia, devido à falta de consciência por parte da população ao jogar lixos nas ruas, poluindo assim, todo o meio ambiente (CASTRO, 2003).

2.1.3 Medidas mitigadoras

Tendo em vista os vários transtornos enfrentados pela população a nível global, decorrentes dos estragos e prejuízos gerados por todos os eventos citados nos itens anteriores, torna-se extremamente necessário por parte da engenharia e de setores governamentais, propor soluções para restringir esses impactos.

Na década de 1960, alguns países passaram a se questionar sobre as obras de drenagem urbana que estavam sendo realizadas com a intenção de afastar rapidamente as águas que se encontravam acumuladas em locais importantes (POMPÊO, 2016). De acordo com Urbonas e Stahre (1993), a implantação da drenagem sem um correto estudo nos dimensionamentos e projetos, não resolve o problema e sim, somente o transfere para regiões a jusante. Além disso, a colocação das canalizações, bem como de outros dispositivos de drenagem, elevam ainda mais o custo, chegando a valores bastante altos economicamente quando comparado ao custo de uma bacia de retenção por exemplo, que faz com que a vazão máxima diminua em locais mais baixos (URBONAS e STAHRÉ, 1993; TUCCI, 2003).

Com isso, visando diminuir e amenizar os problemas causados pelos eventos de enchente e inundação, Tucci (1997), propõe algumas ações de controle, as então chamadas medidas mitigadoras. Segundo o autor, elas podem ser classificadas em: medidas estruturais e não-estruturais.

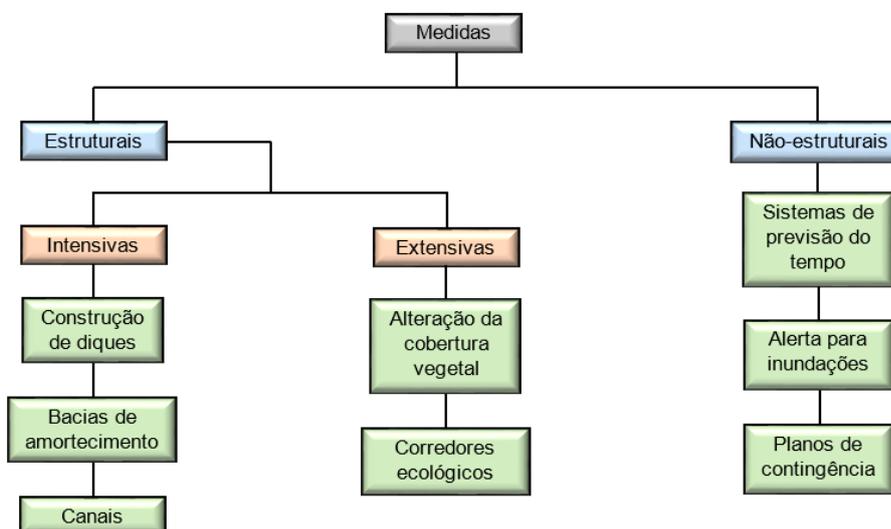
- Medidas estruturais: são aquelas que de forma física alteram o sistema fluvial, ou seja, modificam a paisagem e as características naturais da bacia, através de obras hidráulicas. Consiste basicamente em intervenções nas calhas, alteração de declividades, seções e trajetos de escoamento. Os exemplos mais comuns são as canalizações, reservatórios, barragens e diques de contenção.
- Medidas não estruturais: são aquelas destinadas ao controle e minimização dos efeitos da água, sem que haja a necessidade do uso de estruturas que alterem o seu regime de escoamento. Consiste em práticas voltadas a ocupação e uso do solo, de forma a buscar uma melhor convivência da população frente a esses

eventos. Os exemplos mais comuns são os sistemas de previsão do tempo e alerta para inundações, planos de contingência da Defesa Civil e participações públicas em programas para educação ambiental e gestão de recursos hídricos.

As medidas estruturais ainda podem ser subdivididas em duas categorias: medidas intensivas e extensivas. Segundo Tucci (1997), medidas intensivas são as ações de intervenções das obras de engenharia, que atuam diretamente no rio, sejam elas para acelerar o escoamento (construção de diques), retardar o escoamento (bacias de amortecimento) ou desviar o escoamento (canais). Já medidas extensivas são as ações que visam intervir diretamente na bacia, de modo a alterar as relações entre chuva e vazão para que assim, retarde os picos de enchente. Como exemplo pode-se citar a inserção de corredores ecológicos.

O fluxograma a seguir, nos apresenta as diferentes classificações e exemplos de medidas mitigadoras (Figura 7).

Figura 7 – Fluxograma de medidas mitigadoras



Fonte: Elaborado pelo autor.

As bacias de amortecimento, ao exemplo de medida estrutural intensiva, são uma boa opção para reter as parcelas do volume de água que escoam ao longo do perímetro urbano, diminuindo consideravelmente os picos de vazão. Segundo entrevista com a engenheira ambiental Sofia Royer Moraes concedida pela Rádio Independente de Lajeado/RS (2018), o Parque dos Dick (Figura 8), localizado na

mesma cidade, é um local que pode ser considerado como bacia de amortecimento, visto que o mesmo possui uma grande área desabitada e de lazer, com declividades inferiores, no qual em dias de chuvas muito fortes, acaba se estabelecendo uma extensa lâmina de água sobre o mesmo.

Figura 8 – Parque dos Dick



Fonte: O Informativo do Vale (2017).

Crédito: Lidiane Mallmann (2017).

Como já citado em exemplo anterior, atualmente, muitos municípios brasileiros já possuem através de prefeituras, planos de contingência que contribuem ao planejamento urbano contra a atuação da água, através do forte trabalho das defesas civis municipais. De forma similar a todos os locais, o mesmo consiste num plano elaborado com antecipação, sendo fundamentado em um determinado cenário de desastre, que objetiva facilitar a resposta frente às situações de socorro ou perigo.

Retratando alguns destes trabalhos empenhados pelos profissionais da Defesa Civil, a seguir seguem imagens (Figura 9) de uma situação de inundação no município de Estrela/RS.

Figura 9 – Inundação no município de Estrela/RS



Fonte: Defesa Civil de Estrela (2019).

Portanto, afim de minimizar os problemas ocasionados por inundações, estes terão resultado positivo somente se forem praticadas soluções integradas entre ambas medidas (estruturais e não-estruturais), pois o homem não conseguirá controlar completamente todos os eventos, visto que as duas ações apenas mitigam os impactos sofridos. Ainda, segundo Tucci (2003), além da importância de implantar as duas ações de controle em forma conjunta, haverá uma grande necessidade por parte da nova geração de profissionais de engenharia, propor um planejamento mais sustentável do ambiente levando-os à soluções mais adequadas frente a administração dos problemas nas questões ambientais.

2.2 Modelos de transformação chuva-vazão

Segundo Kobiyama (2009), a hidrologia é a ciência que aborda e estuda o ciclo hidrológico presente na terra, tratando dos processos físicos ocorrentes e das suas interações com o meio natural. Suas etapas são: precipitação, interceptação vegetal, escoamento fluvial, infiltração, percolação da água no solo e evapotranspiração. Ainda para o mesmo autor, todas essas variáveis são muito importantes de serem compreendidas, visto que as mesmas influenciam diretamente na aplicação de dados para o sistema de modelagem hidrológica.

Com o passar dos anos, vem havendo cada vez mais uma maior preocupação com os recursos naturais, por consequência disto, o monitoramento de dados e o uso de ferramentas de modelagens e simulação, bem como o seu desenvolvimento, cresceram significativamente nas últimas décadas. Conforme

Paiva e Paiva (2001), um dos fatores mais importantes para caracterizar corretamente os recursos hídricos são os monitoramentos hidrológicos.

Diante da alta complexidade dos mais variados tipos de fenômenos ocorrentes no ciclo hidrológico e para um melhor entendimento em relação ao comportamento da água numa região, acaba se tornando extremamente necessário e fundamental a utilização desses modelos como ferramentas computacionais (TUCCI, 1998). Para a aplicação dos mesmos, é primordial que o local de análise possua informações confiáveis sobre as séries históricas, através de dados hidrológicos e hidráulicos (PAIVA; PAIVA, 2001).

Para Christofolletti (1999), os modelos hidrológicos são definidos como uma representação simplificada do que realmente acontece em nossa realidade. Sendo assim, eles nos permitem reproduzir em um determinado espaço ou ambiente físico, as precipitações, analisando os seus comportamentos ao longo de uma bacia, podendo também realizar a simulação das vazões durante o seu escoamento.

Os melhores softwares de simulação hidrológica são aqueles que mais se aproximam com o cenário real. Na sua aplicação, assim como para qualquer modelo, as entradas mais relevantes são os dados de chuvas juntamente com a área de drenagem do local (PAIVA; PAIVA, 2001; TUCCI, 1998).

Conforme Marinho et al., (2012), os estudos através destes modelos vem apresentando resultados bastantes satisfatórios na simulação e previsão das vazões de água, de tal forma que está sendo capaz de prever os possíveis impactos a ela associada. Contudo, todo esse processo envolve um conjunto de equações que dependem de diversos parâmetros e variáveis, onde a cada dia estão sendo mais aplicados em pesquisas voltadas a questões ambientais (Marinho et al., 2012). Esses parâmetros representam os componentes presentes no ciclo hidrológico, onde são ajustados de acordo com os dados locais. Desse modo, as vazões correspondem a integração de todos os meios de saída, enquanto que a precipitação caracteriza a sua entrada de água em uma bacia (COLLISCHONN; TUCCI, 2001).

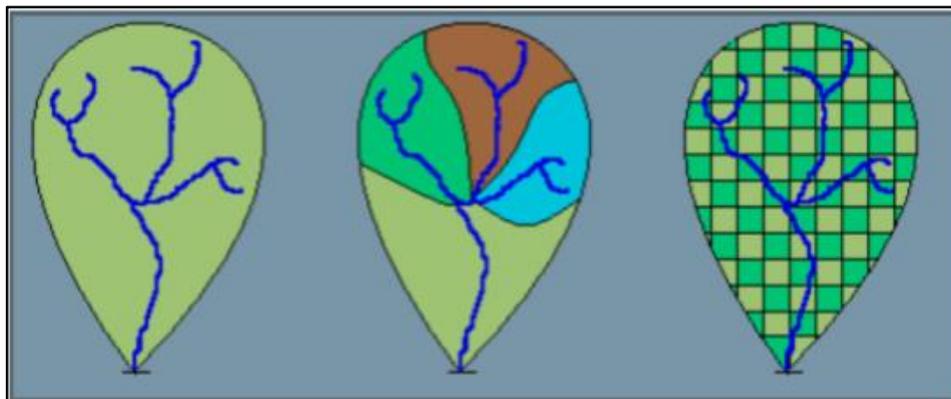
De acordo com Tucci (1998), os modelos hidrológicos podem ser classificados em função do tipo de variável a ser utilizada (estocásticos ou determinísticos), tipo de relação entre essas variáveis (conceituais ou empíricos), e variabilidade espacial conforme o tamanho da bacia (concentrados ou distribuídos).

- a) **Estocástico ou Determinístico:** dita-se estocástico quando o conceito probabilístico e comportamento aleatório é considerado na formulação de um modelo, e determinístico quando se desconsidera a existência de probabilidade, ou seja, quando o modelo gera uma saída em condições iniciais iguais aos de entrada.
- b) **Conceitual ou Empírico:** dita-se conceitual quando os modelos consideram os conceitos físicos relativos aos processos hidrológicos, e empírico quando utilizam funções sem nenhuma relação aos processos físicos envolvidos. São baseados através de análises estatísticas com a utilização de valores obtidos por meio de relações empíricas estimadas como, por exemplo, métodos de correlação bem como análise de regressão.
- c) **Concentrado ou Distribuído:** dita-se modelo concentrado quando a variabilidade espacial de uma bacia não é levada em consideração, ou seja, utiliza-se o tempo como uma variável independente através de um determinado valor médio, considerando que todas as variáveis, tanto de entrada quanto de saída, são representativas em toda área estudada. Já o modelo distribuído, é quando o espaço e o tempo são fatores dependentes para os parâmetros e variáveis.

De todos os modelos hidrológicos existentes, alguns deles são denominados chuva-vazão, visto que muitas vezes são aplicados partindo de uma precipitação já conhecida para simular a resposta de uma bacia em formas de vazão numa especificada seção fluvial (MOREIRA, 2005). Se baseiam principalmente no princípio de que a água da chuva em excesso não infiltrada no solo, se concentra nas pequenas depressões de um terreno até formar as lâminas d'água, e por consequência, gera o seu escoamento de superfície. Como resultados encontrados para esse modelo, estão os hidrogramas situados no exutório dessas áreas de drenagem (PERES, 2015). Por conta de todos esses fatores, eles vem nos mostrando como adequados nas previsões de enchentes, apresentando muitas vezes, elevada antecedência neste tipo de previsão (MOREIRA, 2005).

Os modelos chuva-vazão geralmente adotam critérios para realizar uma subdivisão espacial, representando o local através de estruturas de discretização conforme ilustrado na Figura 10 (GOURLEY e VIEUX, 2006).

Figura 10 – Discretização de bacias hidrológicas



Fonte: De Conto, 2009 apud (RABAIOLI, 2013).

De acordo com Gourley e Vieux (2006), no modelo concentrado na primeira imagem (Figura 10), toda a bacia é caracterizada por precipitação média, no qual os processos hidrológicos são representados por parâmetros concentrados no espaço, sendo principalmente utilizado em pequenas bacias. Já no modelo distribuído na segunda imagem (Figura 10), a bacia é subdividida em sub-bacias com base na disponibilidade de dados, locais de interesse, e pela variabilidade dos seus parâmetros físicos. Por fim, o último modelo na terceira imagem (Figura 10) sendo este distribuído por módulos, a bacia é dividida em formas geométricas caracterizando internamente os elementos do processo. Essa discretização, busca um maior detalhamento quando comparado ao anterior, porém, o problema desse modelo é a dificuldade no entendimento da integração de seus processos e no ajuste dos parâmetros, devido a elevada quantidade de módulos criados.

Entretanto, para entender como se comporta um escoamento superficial numa dada bacia hidrográfica, torna-se necessária a aplicação de alguns métodos que utilizam, em sua maioria, o conceito do hidrograma unitário. Estes, levam em consideração fatores como o da bacia ter sido submetida a uma chuva unitária ocorrida durante um determinado período de tempo, ilustrando a sua configuração através de representações gráficas (TUCCI, 2014).

Atualmente, existem vários modelos que são utilizados para simular a precipitação em escoamento sobre uma bacia. O método do SCS (*Soil Conservation Service*) geralmente é o mais aplicado, devido ao mesmo possuir como principais características, uma reduzida quantidade de parâmetros e expressar mais detalhadamente o valor da precipitação efetiva (COLLISCHONN; DORNELLES,

2013). Além deste, também há outros, citando alguns como exemplo: o Método Racional, Método de Clark e Método de Snyder, comentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Métodos aplicados para a simulação de precipitação em escoamento

<p>Método do SCS (TOMAZ, 2002).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Baseia-se no conceito do hidrograma unitário, denominado como unidade de tempo. Posteriormente, foi interpretado como unidade de precipitação excedente de 1cm (Ven te Chow, Maidment e Mays, 1888); - A sua obtenção é tida através da análise de dados da bacia em estudo (chuvas, vazões, etc.), porém tratando da dificuldade em conseguir estas informações, utiliza-se fórmulas empíricas para se ter os chamados hidrogramas sintéticos; - Método relativamente simples, utilizado para estimativa do volume de escoamento resultante da chuva, onde é bem aplicado para bacias de maiores dimensões.
<p>Método Racional (TOMAZ, 2002).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Baseia-se no estabelecimento da relação entre precipitação e escoamento superficial, ou seja, busca conhecer as séries de vazões no tempo e espaço, usando os dados da chuva; - Método bastante comum e muito utilizado atualmente para o cálculo da vazão de pico num determinado local de estudo, onde é bem aplicado para bacias de menores dimensões.
<p>Método de Clark (TOMAZ, 2009).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Similarmente conhecido como Método do Tempo-Área, utiliza o conceito do hidrograma unitário, assim como o SCS; - Baseia-se na divisão de uma bacia em subáreas para posterior translação destas, afim de que todas elas possam contribuir na vazão. Também corresponde em simular um amortecimento da água, através de reservatório linear, passando a considerar a sua contribuição ao término da chuva, em decorrência da redução da lâmina d'água.
<p>Método de Snyder (TUCCI, 2009).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Este também utiliza o conceito do hidrograma unitário para determinar a transformação da chuva em escoamento; - O mesmo visa o estabelecimento de um conjunto de equações, relacionadas as características físicas de uma bacia, adotando como principais parâmetros o tempo de retardo, tempo de pico e vazão de pico; - Diferentemente do método do SCS, este não utiliza o conceito do tempo de concentração, o que leva para alguns autores, uma aparência de menor exatidão. Porém ainda assim, é muito bem aceito e utilizado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o presente capítulo, serão abordados mais detalhadamente apenas o método do SCS e Método Racional, objetivando destacar os seus principais aspectos e maneiras de aplicação, visto que um utiliza o conceito do hidrograma unitário e é normalmente aplicado para bacias maiores, e o outro sendo mais simples, aplicado em bacias menores.

2.2.1 Método do SCS

Originado do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, o método USDA-SCS é um recurso que considera o escoamento unitário em função de aspectos como: chuva antecedente, cobertura vegetal, impermeabilidade e tipologia do solo, bem como a sua utilização e condições de superfície. Todos estes fatores são agrupados em um só algoritmo, no qual a precipitação total é transformada em precipitação efetiva, sendo o CN (*Curve Number*), o parâmetro a ser ajustado (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016).

Este parâmetro (CN), é uma variável estimada que leva em consideração os aspectos mencionados no parágrafo anterior. Os seus valores, são utilizados no cálculo de hietogramas de chuva excessiva para a decorrente determinação de hidrogramas, permitindo assim, a obtenção da máxima vazão em uma área contribuinte ou bacia hidrográfica (SOUZA; CRISPIM; FORMIGA, 2012).

De acordo com Tucci (1998), para implantar o SCS, primeiramente deve-se calcular o volume superficial, ou seja, a precipitação efetiva. A sua determinação é resultante da expressão apresentada na equação (1) a seguir:

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P + S - Ia} \quad (1)$$

Sendo:

Pe = precipitação efetiva (mm);

P = precipitação total acumulada (mm);

I_a = perdas iniciais (mm);

S = retenção do solo (mm).

O valor das perdas iniciais (I_a) é estimado em condições médias, sendo $I_a = 0,2S$, representando 20% da capacidade do solo. Recomendado pelo NRCS (*Serviço de Conservação de Recursos Naturais*), a equação (1) pode ser reescrita conforme equação (2):

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

Segundo o mesmo autor, para o cálculo da máxima capacidade de infiltração do solo (S), o parâmetro CN é a variável a ser estabelecida, sendo classificado em função do uso e tipologia do solo. A escala que estabelece os possíveis valores atribuídos a CN vai de 0 a 100, variando em cobertura bastante permeável e completamente impermeável. A referida expressão encontra-se a seguir na equação (3):

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

Sendo:

S = máxima capacidade de infiltração do solo;

CN = parâmetro número de curva (*Curve Number*).

O conhecimento do solo da região é um outro aspecto muito importante a ser estudado, pois além de ser um parâmetro para definir o número da curva (CN), ele também define como se comportará o escoamento e como será a proporção de água infiltrada no terreno. Portanto, para a sua escolha, pode-se verificar as diferentes classificações dos grupos identificados por letras a partir da Tabela 3. Estes grupos se referem aos tipos de solos, onde contém a análise da capacidade mínima de absorção de água para cada um deles (SARTORI et al., 2005).

Tabela 3 – Grupo e características do solo

Grupo de solo	Características do solo
A	Solos argilosos e bem profundos, apresentando alta taxa de infiltração e alta resistência à erosão.
B	Solos areno-argilosos, apresentando taxa de infiltração e moderada resistência à erosão.
C	Solos com bastante argila e pouco profundos, apresentando taxa de infiltração e baixa resistência à erosão.
D	Solos rasos, apresentando baixa taxa de infiltração e pouca resistência à erosão. Para este grupo entram os solos orgânicos.

Fonte: Adaptado de (SARTORI et al., 2005).

Identificado o grupo de solo, analisa-se então as tabelas a seguir, que contemplam os valores de CN para bacias urbanas e rurais.

Tabela 4 – Valores de CN para bacias urbanas

Utilização ou cobertura do solo	Grupo de solos			
	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo	72	81	88	91
com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Baldios em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas com cobertura ruim	45	66	77	83
Floresta: cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições				
Com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
Com relva de 50% a 75% da área	49	69	79	84
Zonas industriais	89	92	94	95
Zonas residenciais				
Lotes de (m ²)	% média impermeável			
<500	65	77	85	90
1000	38	61	75	83
1300	30	57	72	81
2000	25	54	70	80
4000	20	51	68	79
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Arruamentos e estradas				
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
Paralelepípedos	76	85	89	91
Terra	72	82	87	89

Fonte: Adaptado de Tucci et al., (1993) apud (TOMAZ, 2002).

Tabela 5 – Valores de CN para bacias rurais

Uso do solo	Superfície do solo	Grupo do solo			
		A	B	C	D
	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curva de nível	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curvas de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normais	36	60	73	79
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras, estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, de baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

Fonte: Adaptado de Tucci et al., (1993) apud (TOMAZ, 2002).

Com isso, realiza-se a determinação do CN médio representativo aos locais de estudo, a partir do cruzamento entre os mapas de solo, utilizando técnicas de geoprocessamento. Considerando que no método do SCS, os valores obtidos deste parâmetro podem ser corrigidos em função da sua umidade antecedente para três

tipos de condições, as equações a seguir expressam respectivamente um solo seco para condição (I) com precipitações inferiores a 13 mm, referente aos últimos cinco dias anteriores do evento selecionado, e a condição (III) resultante em um solo úmido próximo a saturação e com precipitações superiores a 53 mm (LEAL et al., 2017).

$$CN(I) = \frac{4,2 * CN(II)}{10 - 0,058 * CN(II)} \quad (4)$$

Sendo:

$CN(I)$ = solo seco;

$CN(II)$ = valor do CN médio ponderado em cada bacia de estudo.

$$CN(III) = \frac{23 * CN(II)}{10 + 0,13 * CN(II)} \quad (5)$$

Sendo:

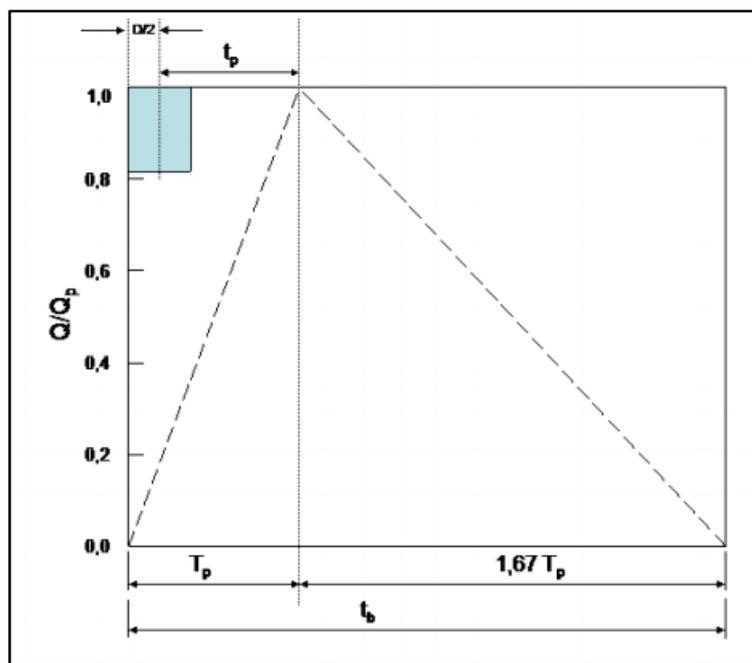
$CN(III)$ = solo úmido próximo a saturação;

$CN(II)$ = valor do CN médio ponderado em cada bacia de estudo.

Desta forma, com a estimação do parâmetro CN baseado em aspectos como tipo, uso e umidade antecedente do solo, torna-se possível determinar a parcela de chuva que irá gerar o escoamento superficial e posteriormente, a sua distribuição e volume em uma área de drenagem (SARTORI et al., 2005).

Contudo, utilizando o conceito do Hidrograma Unitário Triangular (HUT), o SCS também consiste em aproximar um hidrograma unitário curvilíneo em um triângulo, que por sua vez possui um tempo de base menor, apresentando porcentagem semelhante ao volume de cheia na parte ascendente (PORTELA, 2006). A esquematização desse triângulo pode ser observada na Figura 11, onde as seguintes variáveis representam a vazão de pico (Q_p), o tempo de pico (T_p) pertinente à sua ocorrência, e o tempo de base (T_b) medido no início até o final do escoamento (COLLISCHONN; TASSI, 2008).

Figura 11 – Forma esquemática do Hidrograma Sintético Triangular



Fonte: (COLLISCHONN; TASSI, 2008).

Para a sua elaboração, entretanto, torna-se necessário definir o tempo de concentração da bacia, ou seja, o tempo levado para que toda uma determinada bacia contribua no escoamento superficial até o seu exutório (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Existem diversas maneiras de se calcular o tempo de concentração, através de fórmulas empíricas. Porém, apesar desses simples métodos, esta informação não é fácil de ser obtida na prática, tendo em vista os vários aspectos a serem analisados como: área, comprimento e declividade do talvegue. Apesar de, praticamente, todas as fórmulas desenvolvidas para encontrar o tempo de concentração serem baseadas em pesquisas e diagnósticos realizados para bacias de outros países, é muito comum utilizá-las no Brasil, visto que as mesmas acabam sendo bem aceitas ao se caracterizar a realidade de uma determinada área de drenagem (SILVEIRA, 2005).

Podemos calcular esse parâmetro usando equações empíricas como, por exemplo, o método da Kirpich, método de Ven te Chow, método de Picking e vários outros. Estas equações seguem discriminadas a seguir (SILVEIRA, 2005).

- Fórmula de Kirpich - equação (6):

$$T_c = 0,0663 * L^{0,77} * S^{-0,385} \quad (6)$$

Sendo:

T_c = tempo de concentração (h);

L = comprimento do talvegue (km);

S = declividade (m/m).

- Fórmula de Ven te Chow - equação (7):

$$T_c = 0,160 * L^{0,64} * S^{-0,32} \quad (7)$$

Sendo:

T_c = tempo de concentração (h);

L = comprimento do talvegue (km);

S = declividade (m/m).

- Fórmula de Picking - equação (8):

$$T_c = 0,0883 * L^{0,667} * S^{-0,333} \quad (8)$$

Sendo:

T_c = tempo de concentração (h);

L = comprimento do talvegue (km);

S = declividade (m/m).

Com isso, uma vez calculado o tempo de concentração, a simulação do hidrograma pode ser realizada, através do desenvolvimento do triângulo sintético. Deste modo, o tempo para que a sua máxima vazão seja obtida, ou seja, o tempo para que a elevação da vazão do hidrograma chegue até o pico, pode ser definido conforme equação (9) (apud JACOBUS, 2014):

$$T_p = T_c * 0,6 + \left(\frac{D}{2}\right) \quad (9)$$

Sendo:

T_p = tempo de pico (minutos);

T_c = tempo de concentração (minutos);

D = duração da chuva unitária (minutos).

Já o tempo de base (T_b) para o mesmo hidrograma, é determinado estimando em 2,67 vezes o resultado do tempo de pico, sendo o cálculo da máxima vazão dado pela equação (10) a seguir (apud JACOBUS, 2014).

$$Q_p = \frac{2,08 * A}{T_p} \quad (10)$$

Sendo:

Q_p = vazão de pico (m^3/s por 1 cm de precipitação efetiva);

A = área (km^2);

T_p = tempo de pico (horas).

Portanto, com a finalização das etapas descritas, tem-se então todos os processos de cálculo necessários para que se obtenha o comportamento sintético do hidrograma unitário, resultando com isso, na aplicação do método SCS, ao objetivo de analisar a propagação superficial associada a relação chuva-vazão (PMPA/IPH, 2005).

2.2.2 Método Racional

O método racional, assim como o método do SCS, também é um outro modelo de cálculo utilizado para quantificar o total de precipitação ocorrida, na qual se transformou em escoamento superficial. Trata-se de um modelo simples, onde é muito empregado para bacias pequenas com área, segundo Tucci (2009), $\leq 2,5 km^2$.

Este valor limite, se diverge conforme outras bibliografias e autores. O DNIT (2005) por exemplo, define essa delimitação de área em até $1 km^2$ para aplicação do

método racional, ao modo que para bacias maiores, indo até 10 km², torna-se necessário utilizar o método racional corrigido através de um fator de redução. Já autores como Tomaz (2002) e Ramos et al., (1999), estipulam a medida de 3 km² como valor limite a ser adotado para aplicar o método.

Portanto, conforme ideologia de Tucci (2009), utiliza-se então o método racional para verificar a vazão quando em bacias de menores dimensões e com tempo de concentração inferior a 1 hora, e o princípio do hidrograma unitário para bacias médias, ou seja, maiores que 2,5 km² com limites superiores de 1.000 km² e tempo de concentração em até 12 horas.

Logo, na sua aplicação, para obter então como resultado a máxima vazão em uma determinada seção de estudo considerada, a fórmula representada para esse método é a seguinte (equação 11):

$$Q = \frac{C * I * A}{3,6} \quad (11)$$

Sendo:

Q = vazão de deflúvio (m³/s);

C = coeficiente de deflúvio superficial;

I = intensidade da chuva (mm/h);

A = área de drenagem da bacia (km²).

Os princípios básicos para esta metodologia são (TOMAZ, 2002):

- O escoamento superficial recebe a contribuição de toda a bacia, considerando a duração da precipitação igual ou superior ao seu tempo de concentração;
- A chuva ocorre de maneira uniforme e com intensidade constante, distribuindo-se por toda área da bacia;
- Todas as possíveis perdas são atribuídas a um coeficiente único, denominado “C” (coeficiente de escoamento).

Com o objetivo de encontrar a máxima descarga da bacia, relacionando a intensidade da precipitação com a área, se dispõe uma expressão bem simplificada,

na qual podemos destacar o coeficiente “C” ou coeficiente de escoamento. Para adotá-lo, deve ser levado em consideração alguns aspectos em relação ao tipo, uso, cobertura e umidade do solo, assim como também a intensidade pluviométrica e as perdas geradas pela evapotranspiração, interceptação e infiltração (DNIT, 2005). Existem diferentes modelos de tabelas e vários métodos utilizados para a sua determinação, apresentando aqui um destes exemplos, a seguir são apresentados os valores atribuídos para “C” com base nas condições de superfície, através do DNIT (*Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*).

Tabela 6 – Coeficientes de escoamento superficial com base em superfícies

TIPO DE SUPERFÍCIE	COEFICIENTE “C”
Ruas:	
Asfalto	0,70 a 0,95
Concreto	0,80 a 0,95
Tijolos	0,70 a 0,85
Trajeto de acesso a calçadas	0,75 a 0,85
Telhados	0,75 a 0,95
Gramados; solos arenosos:	
Plano, 2%	0,05 a 0,10
Médio, 2 a 7%	0,10 a 0,15
Íngreme, 7%	0,15 a 0,20
Gramados; solo compacto:	
Plano, 2%	0,13 a 0,17
Médio, 2 a 7%	0,18 a 0,22
Íngreme, 7%	0,15 a 0,35

Fonte: Adaptado de DNIT (2005).

A intensidade de precipitação, assim considerada no método, é um aspecto que depende de alguns fatores como tempo de concentração, tempo de retorno e equação IDF (intensidade-duração-frequência) característica de determinada região. As relações IDF geralmente são obtidas a partir de uma análise estatística contendo várias informações de dados pluviográficos, baseado em eventos já ocorridos no passado. No Brasil, há uma grande dificuldade na geração de equações matemáticas que representem as curvas IDF, devido à baixa rede de pluviógrafos instalados, causando como consequência, na escassez para obtenção desses registros em alguns locais do país (BERTONI e TUCCI, 1993).

Contudo, dentre algumas das equações expressas resultante das relações IDF, destaca-se uma genérica do tipo (equação 12):

$$I = \frac{a \cdot Tr^b}{(t + c)^d} \quad (12)$$

Sendo:

I = intensidade da precipitação (mm/h);

a, b, c, e d = parâmetros estabelecidos para cada região analisada;

Tr = tempo de retorno (anos);

t = duração da precipitação (minutos).

Para o método racional, o tempo de concentração, assim já definido no item 2.2.1, é uma outra condição muito importante. Por se tratar o mesmo na utilização de bacias pequenas, segundo Tomaz (2002), a sua determinação pode ser obtida aplicando-se algumas das fórmulas de Kirpich existentes, assim como a de outros estudiosos, conforme características da região.

2.3 Modelos de propagação de escoamento

Os modelos de propagação de vazões em cursos d'água nas bacias hidrográficas, tem como principal objetivo relacionar o armazenamento dos segmentos de rios com as vazões de entrada anteriores à seção de interesse, e as vazões de saída, analisando-se os hidrogramas de jusante e montante (COLLISCHON; DORNELLES, 2013). Segundo Tucci (1998), a grande dificuldade na implantação desses modelos é a vasta diversidade espacial das bacias, devido as características que diferem de um local para outro, dificultando assim, no detalhamento do escoamento superficial.

A representação do movimento da água em rios, pode ser determinada por meio das equações de Saint-Venant, ou seja, equação da continuidade (equação 13) e equação da quantidade de movimento (equação 14), cuja a dimensão longitudinal é a predominante (FAN; PONTES; PAIVA, 2014). Ambas equações são apresentadas em ordem a seguir.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gASf - gASo = 0 \quad (14)$$

Sendo:

A = área da seção transversal (m^2);

Q = vazão (m^3/s);

t = tempo (s);

x = distância longitudinal (m);

q = vazão por contribuição lateral (m/s^2);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

h = profundidade do rio (m);

S_f = perda de energia por atrito com o fundo e as margens (m/m);

S_o = declividade do fundo do rio (m/m).

A propagação do escoamento, pode ser classificada nesses modelos tanto para o grupo hidrológico quanto para o hidráulico. Os modelos hidrológicos são os mais aplicados, devido a maior simplicidade e menor necessidade nos volumes de dados, considerando somente o efeito de armazenamento no escoamento, desprezando assim, a utilização da quantidade de movimento. Por sua vez, os modelos hidráulicos apresentam cálculos com mais complexidade, empregando, além de equações, os aspectos hidráulicos dos rios e informações de topografia (TUCCI, 1998).

Existem vários modelos de propagação que podemos destacar, dentre eles o da Onda Cinemática e o Muskingum-Cunge, sendo este último, um dos mais utilizados em simulações. Ambos são brevemente explicados a seguir.

2.3.1 Modelo da Onda Cinemática

O modelo da Onda Cinemática baseia-se em realizar a simulação da propagação de vazões em rios e canais, onde tal propagação, se dá através das equações de Saint-Venant expressas no tópico anterior. Como características, este método permite a condição de uniformidade no escoamento, visto a

desconsideração dos termos de inércia e pressão da equação dinâmica. Ainda assim, o mesmo possui algumas restrições, ou seja, não recomenda ser aplicado em rios que sofrem determinados processos físicos como, por exemplo, o efeito de remanso na abertura de reservatórios ou o efeito das marés com alterações cíclicas no nível da água sobre o escoamento (FAN; PONTES; PAIVA, 2014).

2.3.2 Modelo Muskingum-Cunge

Sendo um dos modelos de escoamento do tipo armazenamento mais utilizado em rios, o presente método foi inicialmente proposto em 1939 por McCarthy, pelo qual teve a sua primeira aplicação no Rio Muskingum, situado nos Estados Unidos. Com o objetivo também de simular a propagação de vazões nos cursos d'água, este permite realizar o cálculo do hidrograma amortecido na seção de saída a jusante de um determinado canal, dado obtenção do hidrograma de entrada a montante (COLLISCHON; DORNELLES, 2013).

Partindo deste princípio, o procedimento de cálculo é realizado utilizando-se também o conceito de uma das equações de Saint-Venant, a equação da continuidade. De acordo com Tucci (1998), o modelo Muskingum-Cunge leva em consideração as relações entre o armazenamento na calha sob forma prismática com as vazões de entrada e saída, assim como a declividade do rio. Dentre alguns dos parâmetros aplicados na simulação e que está relacionado ao fator de rugosidade, é o coeficiente de Manning. Este coeficiente, é determinado de acordo com as características das margens e leito do rio, bem como das condições de tipo de solo e cobertura vegetal, podendo assim, ser admitido em sua atribuição, um valor fixo representativo para a bacia (COLLISCHON, 2001). Logo, na Tabela 7 seguem apresentados os respectivos valores de rugosidade compilados conforme a natureza dos cursos d'água.

Tabela 7 – Coeficientes de rugosidade de Manning

Natureza do leito	Valores de rugosidade para as condições			
	Muito bom	Bom	Regular	Ruim
Canais com leito pedregoso e talude vegetado	0,025	0,030	0,035	0,040
Canais c/ fundo em terra e talude c/ pedras	0,028	0,030	0,033	0,035
Canais de terra (retilíneos e uniformes)	0,017	0,020	0,023	0,025
Canais dragados	0,025	0,028	0,030	0,033
Córregos e rios limpos, retilíneos e uniformes	0,025	0,028	0,030	0,033
Igual ao anterior, porém c/ pedras e vegetação	0,030	0,033	0,035	0,040
Com meandros, bancos e poços, limpos	0,035	0,040	0,045	0,050
Margens espraiadas, pouca vegetação	0,050	0,060	0,070	0,080
Margens espraiadas, muita vegetação	0,075	0,100	0,125	0,150

Fonte: Adaptado de Porto (1998).

Com isso, definindo-se o coeficiente de Manning, ao longo do avanço das ondas de cheias, o volume de escoamento é então calculado, visto que é o momento onde a vazões de entrada superam as de saída.

Em relação as vantagens do modelo Muskingum-Cunge quando comparado ao das ondas cinemáticas, é que este não precisa aplicar as diferenças finitas por meio de equações diferenciais, logo, o resultado pode ser obtido utilizando apenas uma simples equação algébrica linear, de modo a permitir a geração do hidrograma em uma dada seção transversal. Além disso, a solução desta equação, tende a resultar na formação de uma onda com menor atenuação, possibilitando mais flexibilidade na atribuição da razão do tempo e espaço (COLLISCHON; DORNELLES, 2013).

Entretanto, a sua aplicação é limitada pelos mesmos motivos citados no modelo anterior, onde uma alternativa de método para a simulação em rios com declividades baixas, sujeito aos efeitos de marés e com presença de reservatório em alguns trechos, seria a implantação de um outro modelo, citando como exemplo, o até então conhecido Modelo Inercial, que apresenta resultados semelhantes aos demais modelos que se baseiam nas equações de Saint-Venant (FAN; PONTES; PAIVA, 2014).

2.4 HEC-HMS

Com o objetivo de estudar uma bacia hidrográfica e aplicar os conceitos de modelagem hidrológica, muitos recursos e ferramentas computacionais atualmente

estão disponíveis para o auxílio na simulação das máximas vazões, obtidas em um determinado trecho ou seção de análise.

Desta forma, os modelos chuva-vazão podem ser classificados em dois tipos: simulação de evento único ou de evento contínuo. Alguns exemplos de softwares de evento único são o SWMM (*Storm Water Management Model*) e o HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*). Em relação aos usuários desses modelos, os seus maiores interesses estão no tempo e na vazão de pico ou também no hidrograma completo do escoamento (SOUZA; CRISPIM; FORMIGA, 2012).

O modelo hidrológico HEC-HMS é um software desenvolvido para simular e representar os processos de chuva-vazão em bacias urbanas e rurais, através de parâmetros que caracterizam as suas condições médias. O mesmo, foi produzido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (HEC) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE, 2019).

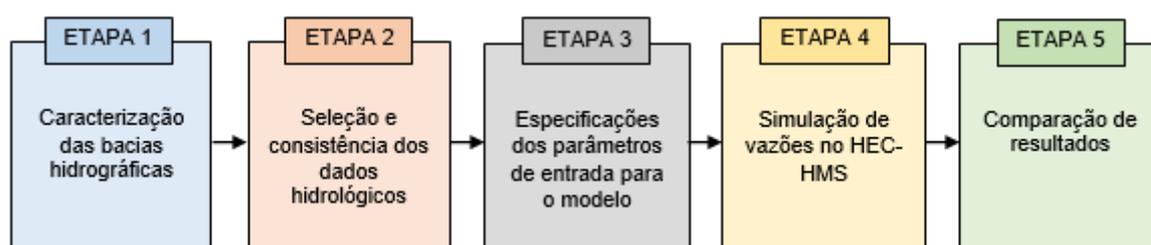
O programa apresenta em sua interface gráfica, um ambiente totalmente integrado contendo um banco de dados e diferentes parâmetros de entrada, de forma a permitir ao usuário movimentações contínuas entre as suas diferentes partes. Além de ter a capacidade de gerar hidrogramas e relatório de resultados, o software pode realizar também a simulação de vazões, tendo em vista que as informações finais obtidas podem ser usadas como ferramenta de dados para outros estudos e em outros programas. Estas informações podem ser os picos de vazão, volume de escoamento direto e de base, tempo de descarga, entre outros (USACE, 2019).

Na sua aplicação, o modelo é simplificado em alguns componentes fundamentais como a combinação de modelo da bacia, módulo meteorológico e as especificações de controle. Inicialmente para o seu processamento, é necessário realizar a delimitação da bacia, indicando as sub-bacias e informando as suas características e arranjos físicos. Posteriormente, deve-se informar a precipitação que irá abranger o local através dos dados meteorológicos e, por último, o intervalo de tempo, definindo data e hora de início do evento chuvoso e o instante final da simulação para a então execução dos cálculos (USACE, 2019).

3 METODOLOGIA

Na metodologia deste trabalho, estão apresentados os procedimentos empregados no desenvolvimento do estudo, nos quais os processos envolvidos foram definidos tanto na descrição e características do local de análise para simulação de vazões, bem como na verificação dos parâmetros a serem calibrados e aplicados posteriormente no software HEC-HMS. Logo, o planejamento do sistema ilustrado na Figura 12, indica as etapas que foram seguidas para compor desde a estrutura metodológica da pesquisa, até a simulação e análise de resultados.

Figura 12 – Fluxograma de planejamento da pesquisa



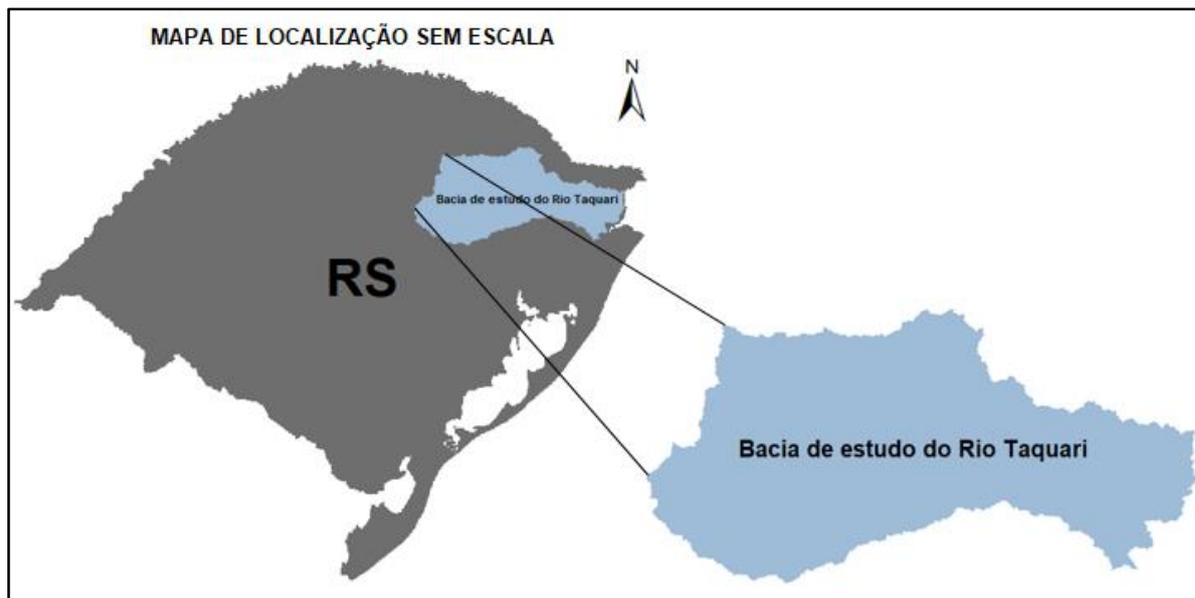
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Características da área de estudo

Localizada na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, a bacia hidrográfica Taquari-Antas conforme os dados da FEPAM (2019), apresenta uma área total de 26.428,00 km², o que corresponde a 9% do território estadual, compreendendo 98 municípios inseridos sobre a mesma e caracterizando-se estes por um alto grau de urbanização. Suas limitações são “ao norte com a bacia do Rio Pelotas, a oeste e ao sul com a bacia do Rio Jacuí e a leste com as bacias dos rios Caí e Sinos, sendo esta bacia o principal afluente do Rio Jacuí, maior formador do Guaíba” (FEPAM, 2019).

A seguir, o mapa de localização da bacia hidrográfica Taquari-Antas (Figura 13) gerada a partir do município de Estrela.

Figura 13 – Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os rios que banham a presente bacia, alguns deles dispõem de uma grande importância regional como o abastecimento de água para a população e produção agrícola, geração de energia, bem como para o transporte hidroviário, sendo eles o Rio Taquari, rio Forqueta e rio Guaporé. A economia da região é direcionada ao setor industrial (FEPAM, 2019).

Conforme classificação de Köppen, a predominância climática da bacia hidrográfica Taquari-Antas é o subtropical úmido, apresentando variedades de dois tipos climáticos: clima subtropical ou virginiano (Cfa), que significa clima temperado moderado chuvoso, com temperatura do mês mais quente sendo superior à 22°C, e clima temperado ou de faixas (Cfb), com temperatura média do mês mais quente inferior à 22°C (MAGNA, 1997). Assim como se espera de um clima temperado, as temperaturas apresentam significativa variabilidade, sendo nos meses de junho a setembro com médias baixas, em alguns casos, bem próximas de 0°C, fazendo com que ocorram as geadas, e médias maiores no verão nos meses de dezembro a março, fazendo com que o termômetro se aproxime da marca dos 40°C (FERRI e TOGNI, 2012).

Ao longo de toda a área da bacia, a precipitação de chuvas é bem distribuída no decorrer do ano, caracterizando-se por possuir um clima úmido (MAGNA, 1997). Segundo Ferri (2012), na região de São Francisco de Paula situada a leste na bacia, as chuvas ocorrem com totais anuais bem significativos, podendo chegar a valores

acima de 2.000 mm, entretanto, as precipitações médias encontram-se acima de 1.600 mm na sua maior porção territorial.

Assim como o clima, um outro fator predominante para a elaboração do estudo são as características fisiográficas da bacia. Os solos presentes nesse território, apresentam bastante diversidade, que vão desde solos com alta fertilidade, localizados nas planícies de inundações do Rio Taquari até solos com baixa fertilidade, sendo estes podzólicos, ou seja, ligados a rochas sedimentares. Dentre outros tipos de solos encontrados estão: solos eutróficos com relevo ondulado, solos constituídos por material mineral (latossolos) e solos com textura argilosa (FEPAM, 2019).

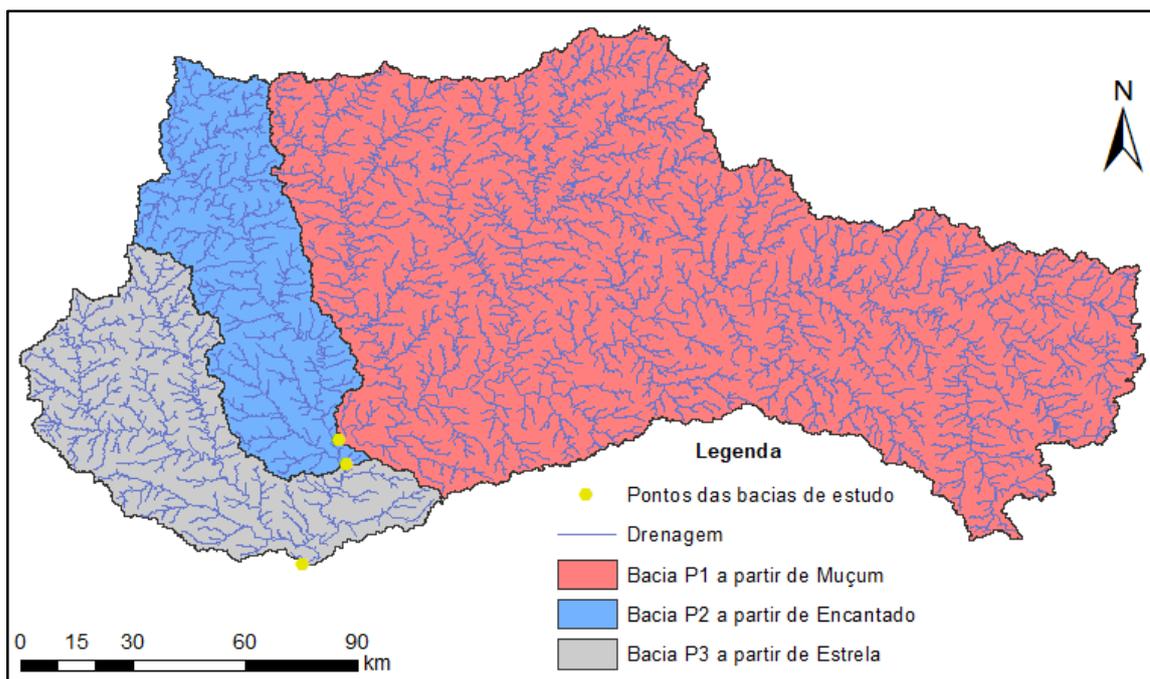
Analisando a altimetria de alguns locais, a região dos Aparados da Serra no extremo leste, apresenta-se como uma das zonas mais altas do estado, na qual possui uma altitude variando os 1.200 metros até aproximadamente o nível do mar, na confluência dos rios Taquari e Jacuí, ou seja, possui declividades bem acentuadas, superiores a 15% ao longo de quase 90% de toda a bacia (FERRI e TOGNI, 2012).

A seguir, são apresentadas as sub-bacias que compõem a área de estudo gerada nos pontos de interesse.

3.1.1 Delimitação das sub-bacias nos pontos de interesse

As informações utilizadas na identificação das características das áreas de contribuição, foram realizadas determinando a altimetria, através da geração de um Modelo Digital de Elevação (MDE) de uma região de interesse do estado do Rio Grande do Sul, por meio do site TOPODATA. Utilizando ferramentas de geoprocessamento, o MDE foi obtido segundo bases cartográficas do SRTM em formato GEOTIFF, com resolução espacial de 30 metros e arquivo vetorial em formato shapefile. Em posse deste arquivo, o mesmo foi posteriormente recortado para a bacia do Rio Taquari, gerando-se uma discretização em três cenários de estudo, a partir das coordenadas dos pontos das estações hidrológicas nas cidades de Estrela, Encantado e Muçum, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 – MDE com as bacias de interesse



Fonte: Elaborado pelo autor.

Entretanto, é importante salientar que neste trabalho as simulações de vazões não foram determinadas considerando a bacia inteira do Taquari-Antas e sim, estudadas a partir dos pontos inseridos, visto que a sua foz está localizada à jusante do município de Estrela, município utilizado como sendo o ponto de referência mais baixo da bacia gerada, dado pela nomenclatura “Bacia P3”. As demais bacias geradas à montante, foram nomeadas em “Bacia P1” a partir de Muçum e “Bacia P2” a partir de Encantado.

3.1.2 Processamento dos índices fisiográficos

A Tabela 8 contempla um resumo dos principais índices nas áreas de interesse, calculados no presente estudo em ambos os cenários (concentrado e semi-distribuído). Para o tempo de concentração, foi adotado a fórmula de Ven te Chow (equação 7), visto que a sua aplicação se deu pela facilidade de obtenção dos parâmetros de entrada extraídos através dos dados altimétricos e pelo resultado ter apresentado maior coerência, conforme ajustes durante a simulação no HEC-HMS. Já a área, o comprimento e declividade dos talvegues, foram obtidos através das ferramentas de geoprocessamento utilizando os arquivos citados anteriormente.

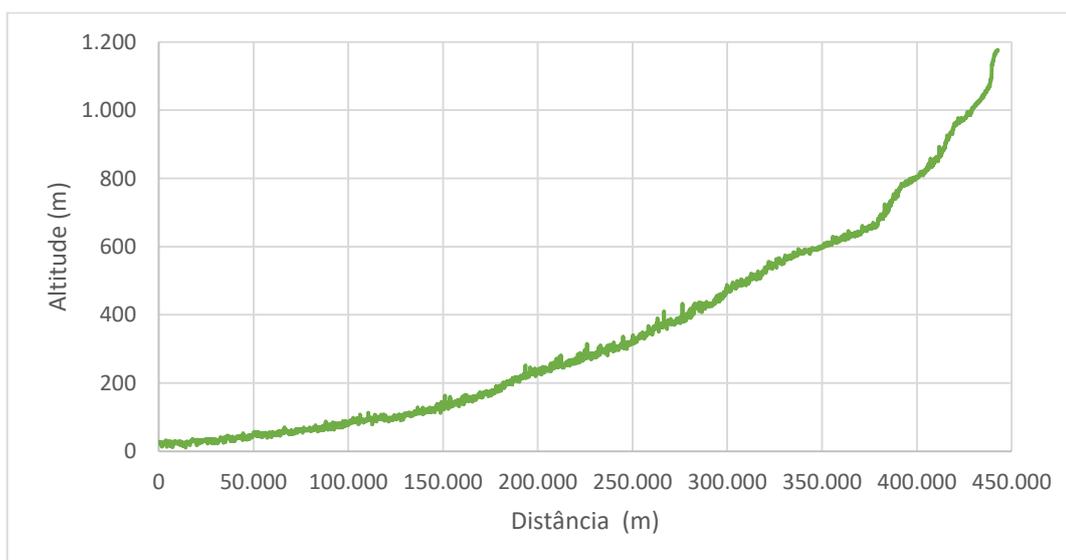
Tabela 8 – Índices fisiográficos das bacias de interesse

MODELO CONCENTRADO				
Local de estudo	Área (km ²)	Talvegue		Tc (h)
		Comprimento (km)	Declividade (%)	
Bacia P3	22823,31	442,79	0,26	53,06
MODELO SEMI-DISTRIBUÍDO				
Local de estudo	Área (km ²)	Talvegue		Tc (h)
		Comprimento (km)	Declividade (%)	
Bacia P1	16173,80	383,94	0,29	46,64
Bacia P2	3114,69	200,06	0,32	29,79
Bacia P3	3534,82	151,39	0,43	22,72

Fonte: Elaborado pelo autor.

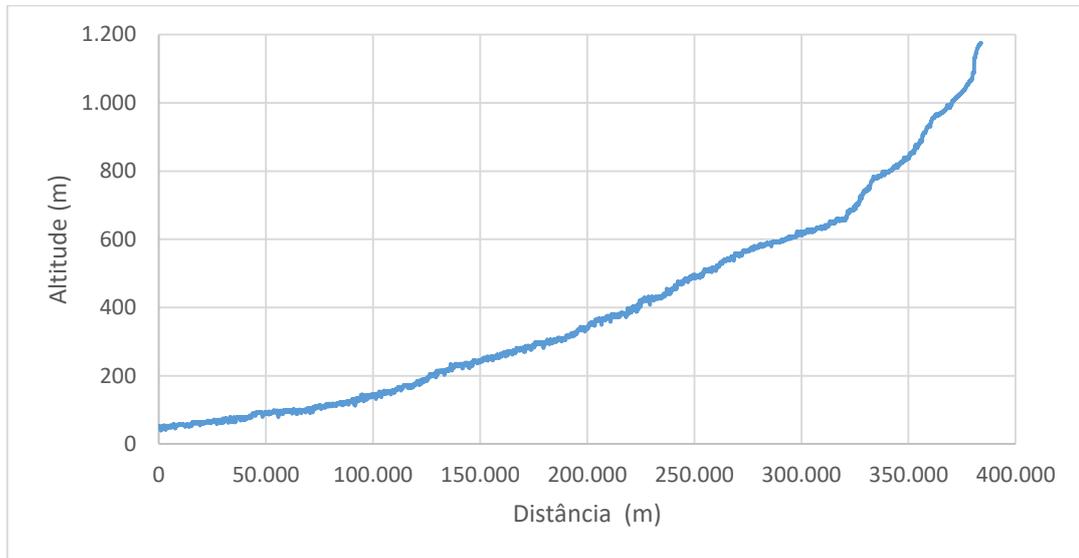
A seguir são apresentados nos gráficos os perfis longitudinais utilizados.

Gráfico 1 – Perfil longitudinal do talvegue principal da bacia P3 para modelo concentrado



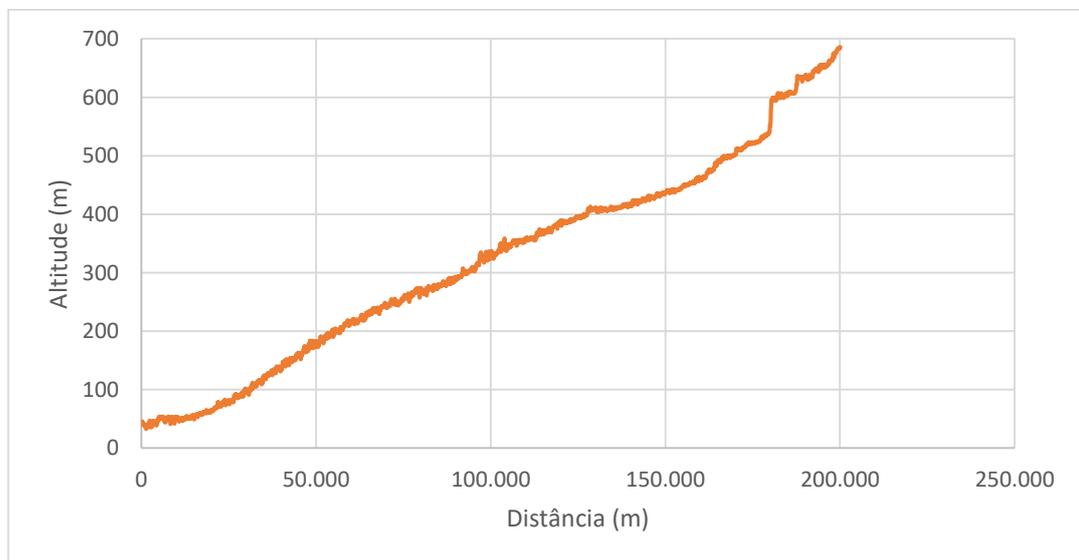
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 – Perfil longitudinal do talvegue principal da bacia P1 para modelo semi-distribuído



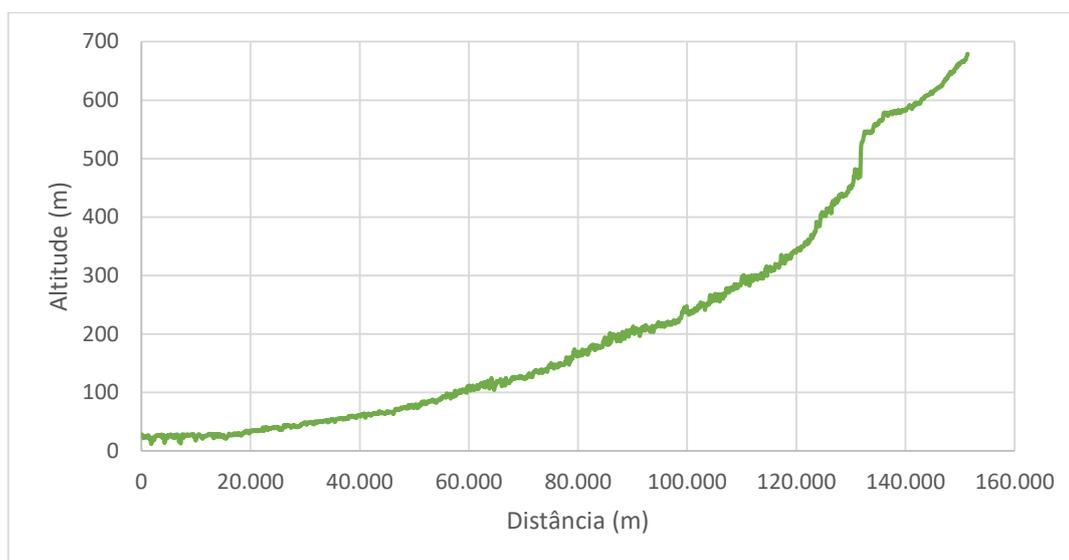
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 – Perfil longitudinal do talvegue principal da bacia P2 para modelo semi-distribuído



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 4 – Perfil longitudinal do talvegue principal da bacia P3 para modelo semi-distribuído



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como as geotecnologias permitem aos usuários realizarem a coleta, o armazenamento e análise de uma grande quantidade de informações espaciais, além de fornecer suprimento de dados aos modelos de simulação, neste estudo, utilizou-se o software ArcGIS (software para Sistemas de Informações Geográficas – SIG) para a geração do mapa de CN médio resultante em cada bacia de interesse, assim como os mapas de tipo e uso do solo. Com os valores de área obtidos para os cenários (sub-bacias P1, P2 e P3), foi realizado uma ponderação, sendo aqui, dos valores de CN junto a sua respectiva área de abrangência. Esta ação se deu por meio de geoprocessamento, através do cruzamento entre os mapas de solo, de tal forma que o CN médio encontrado e corrigido para uma umidade antecedente de solo úmido próximo à saturação, foi o que correspondeu à estimativa do cenário menos permeável aos locais de estudo.

Como procedimento de análise, levando em consideração que o sul do país é um dos locais em que se predomina muito a produção de alimentos, através das plantações de arroz, soja, milho e dentre outros, além das criações de animais como bovinos e suínos, conforme observado na Figura 16 do próximo tópico, percebe-se que as maiores proporções de terra são destinadas à classe adotada como “agro”. Sendo assim, admitindo que nesta classe a característica mais representativa são as

áreas de preparação de solo em cultivo alimentício, foi definida a pertinente classe como sendo plantações regulares em curvas de nível.

Ainda nesta questão, considerando que a região onde está inserida a bacia hidrográfica Taquari-Antas se caracteriza por possuir um clima com bastante umidade, devido também as precipitações que são bem distribuídas pela área ao longo do ano (MAGNA, 1997), definiu-se a classe “floresta” como sendo muito esparsa e de baixa transpiração, levando ao fato que um ambiente com umidade relativa alta, terá uma menor concentração de água nos tecidos vegetais, ou seja, menor transpiração.

Já para a classe “urbano”, por meio de comparações entre o mapa de usos do solo, juntamente com o auxílio do Google Earth, as áreas abrangidas no sentido noroeste das cidades de Encantado e Muçum, contém em sua grande maioria pequenos lotes de residências. Fato esse que justificou a escolha da classe com as menores infiltrações atribuídas aos valores de CN, para lotes com até 500 m².

Com isso, na tabela a seguir, são visualizados os referidos valores de CN para cada classe de uso e tipo de solo identificados na presente bacia, onde com base nesses valores, foi então encontrado o CN médio e corrigido, estando-os apresentado no capítulo das discussões e análises de resultados.

Tabela 9 – Valores de CN em função do uso e tipo de solo

Uso do solo	Valores de CN			
	A	B	C	D
Agro	67	77	83	87
Floresta	56	75	86	91
Urbano	77	85	90	92
Água	99	99	99	99

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tratado a metodologia do SCS, com relação ao modelo de propagação de escoamento de Muskingum-Cunge, que leva em seu procedimento o coeficiente de Manning para os aspectos de rugosidade do leito, conforme Tabela 7, definiu-se para este estudo, o coeficiente n de 0,035 como sendo “córregos e rios limpos, porém com pedras e vegetação” em condição regular. Esta atribuição, foi adotada por meio de fotointerpretações em imagens de satélite em fontes como o Google Earth.

3.1.3 Mapas de tipo e uso do solo

De acordo com a classificação dos tipos de solo apresentados na Tabela 3, a região de estudo abrange uma área contendo oito diferentes solos enquadrados em todos os grupos hidrológicos, devido as suas características físicas. Conforme Tabela 10, podemos observar a nomenclatura destes solos, bem como os seus grupos correspondentes e áreas de abrangência dentro da bacia Taquari-Antas a partir do ponto de Estrela.

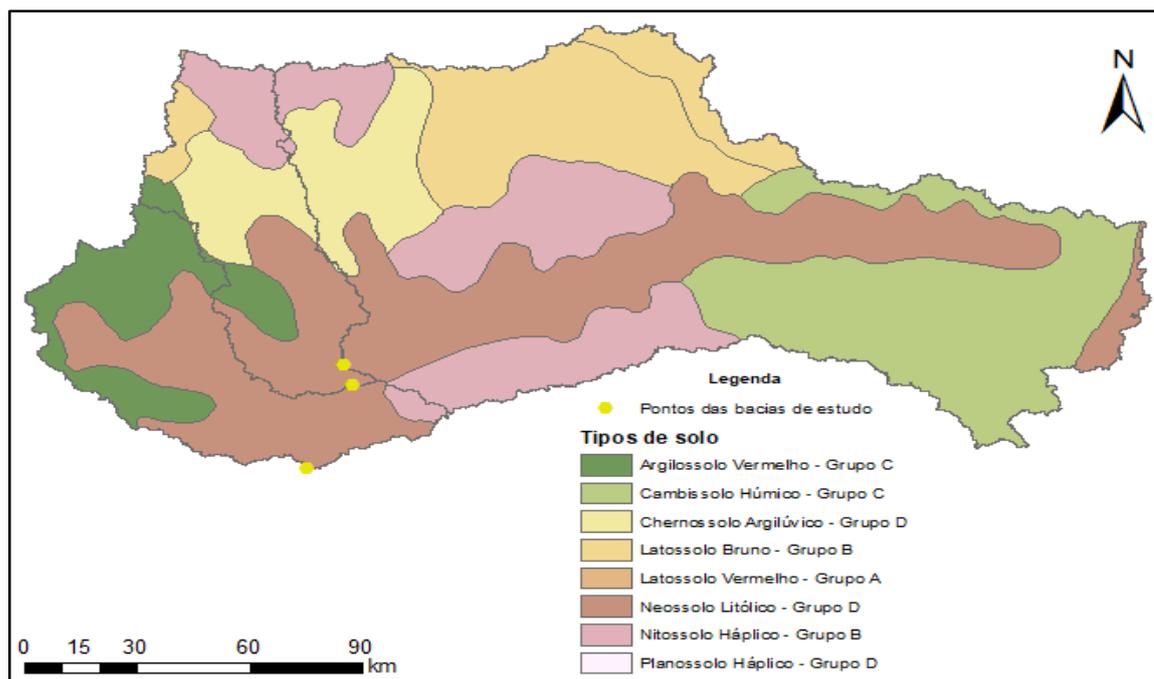
Tabela 10 – Tipos de solo presente na bacia Taquari-Antas

Tipo de solo	Grupo hidrológico	Área ocupada (%)
Argissolo Vermelho	C	7,86
Cambissolo Húmico	C	19,154
Chernossolo Argilúvico	D	9,429
Latossolo Bruno	B	14,843
Latossolo Vermelho	A	0,015
Neossolo Litólico	D	31,527
Nitossolo Háplico	B	17,169
Planossolo Háplico	D	0,003

Fonte: Elaborado pelo autor.

Desse modo, o tipo de solo que dispõe das maiores proporções territoriais é o Neossolo Litólico com 31,527% englobando partes das três sub-bacias de estudo. O mesmo, é caracterizado por ser solos rasos com baixa taxa de infiltração e pouca resistência à erosão, o que proporciona a estes, um alto potencial no escoamento superficial. Seguido deste, o Cambissolo Húmico e o Nitossolo Háplico são os outros que ocupam as maiores áreas com 19,154% e 17,169% respectivamente. A Figura 15, nos mostra o mapa dos tipos de solo presentes na bacia.

Figura 15 – Tipos de solo na bacia do Rio Taquari



Fonte: Adaptado de Embrapa (2019).

Em posse do mapa de cobertura e uso da terra na escala 1:250.000 obtido no site do IBGE (2009), foram identificados e reclassificados as ocupações que compreendem a referida bacia hidrográfica. No entanto, afim de simplificar o estudo e de reduzir alguns usos que são semelhantes e que não alterariam de forma muito significativa o valor correspondente do CN, foi realizado um agrupamento destes em somente uma classe representativa, totalizando assim, em quatro classes diferentes, de acordo com a Tabela 11 a seguir.

Portanto, tomando como esse aspecto, a área agrícola, mosaico de ocupações em área campestre e florestal, e pastagem com manejo, foram definidas como “agro” com 59,344% de área ocupada. Já a silvicultura e a vegetação campestre e florestal, definidas como “floresta” com 39,743% de ocupação. As demais classes como o uso “urbano” e “água”, apresentaram ocupação de 0,904% e 0,009% respectivamente.

Tabela 11 – Classes de uso do solo presente na bacia Taquari-Antas

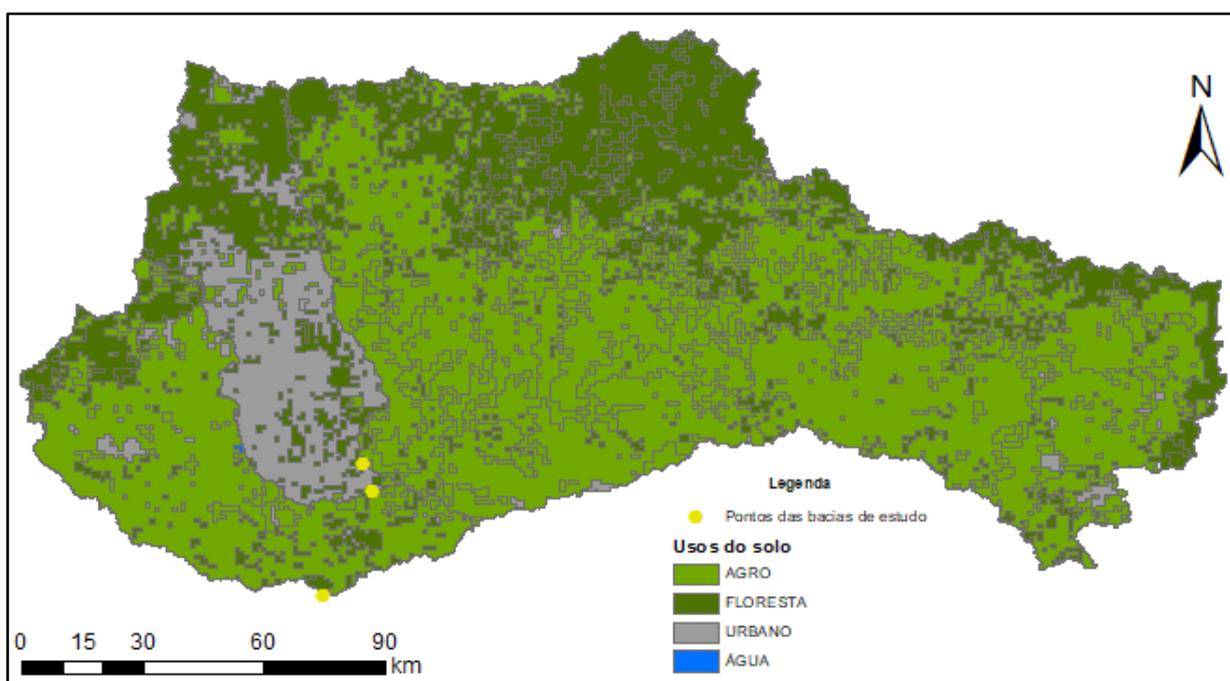
Uso do solo	Reclassificação do uso do solo
Área Agrícola	Agro
Área Artificial	Urbano
Corpo D'água Continental	Água

Uso do solo	Reclassificação do uso do solo
Mosaico de Ocupações em Área Campestre	Agro
Mosaico de Ocupações em Área Florestal	Agro
Pastagem com Manejo	Agro
Silvicultura	Floresta
Vegetação Campestre	Floresta
Vegetação Florestal	Floresta

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para melhor percepção dessas informações, a Figura 16 ilustra a representação espacial dos usos do solo reclassificados para a bacia em estudo.

Figura 16 – Usos do solo na bacia do Rio Taquari



Fonte: Adaptado de IBGE (2019).

3.2 Seleção e consistência dos dados hidrológicos

Afim de quantificar a vazão máxima, através do método HUT, torna-se necessário determinar uma entrada de chuva para o modelo. Para tanto, foram selecionadas as estações hidrológicas descritas na Tabela 13, distribuídas ao longo da bacia hidrográfica com dados telemétricos de chuva e nível. As informações, foram obtidas pelo Sistema Hidroweb, que oferece através do seu portal de internet, o acesso a um banco de dados de várias estações, e CPRM (Companhia de

Pesquisa de Recursos Minerais), atribuídas a uma série histórica de registros diários consistidos no período dos eventos selecionados, onde, com base nesse material, foram também estimadas as vazões ocorridas a partir de curva-chave (Tabela 12) também fornecidas pela CPRM para as três primeiras estações.

Tabela 12 – Curva-chave utilizada

Estrela	Encantado	Muçum
$Q = 455,40 * (h - 10)^{1,151}$	$Q = 109,88 * (h - 1,27)^{1,679}$	$Q = 146,01 * (h - (-0,27))^{1,386}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

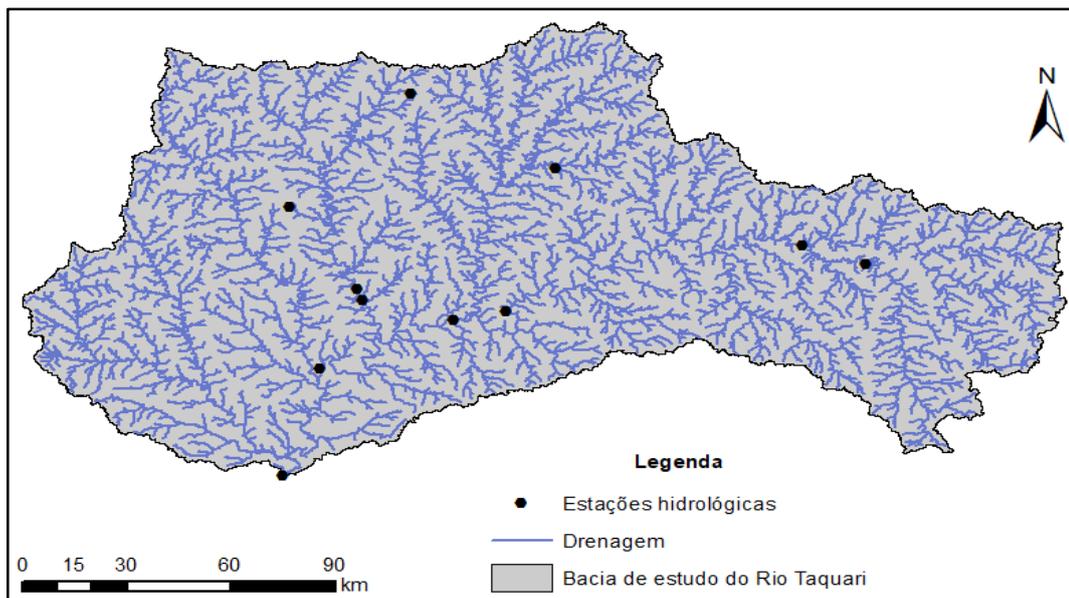
Tabela 13 – Dados das estações hidrológicas

CÓDIGO	ESTAÇÃO	MUNICÍPIO	OPERADORA	PERÍODO DE OPERAÇÃO
86879300	Estrela	Estrela	CPRM	2013 - 2019
86720000	Encantado	Encantado	CPRM	2008 - 2019
86510000	Muçum	Muçum	CPRM	2015 - 2019
86507000	PCH Cotiporã Jusante	Cotiporã	COTIPORÃ	2015 - 2019
86505500	PCH Linha Emilia Jusante	Dois Lajeados	LINHA EMILIA	2015 - 2019
02851072	Ibiraíaras	Ibiraíaras	CPRM	2015 - 2019
86160000	Passo Tainhas	Jaquirana	CPRM	2016 - 2019
02951070	Muçum	Muçum	CPRM	2013 - 2019
86305000	UHE Castro Alves Barramento	Nova Roma do Sul	CERAN	2014 - 2019
86110000	PCH Passo do Meio Jusante	São Francisco de Paula	CAMPO DE CIMA	2015 - 2019
02851073	Serafina Corrêa	Serafina Corrêa	CPRM	2015 - 2019
86380000	Vacaria	Vacaria	CPRM	2015 - 2019
86448000	UHE Monte Claro Barramento	Veranópolis	CPRM	2014 - 2019

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, as estações hidrológicas com os dados de chuva seguem representadas na Figura 17, através dos pontos obtidos pelas coordenadas de cada uma.

Figura 17 – Pontos das estações hidrológicas na bacia de estudo do Rio Taquari



Fonte: Elaborado pelo autor.

Visando garantir a qualidade dos registros e verificar as falhas das séries pluviométricas, atribuídas a possíveis erros de leitura ou pluviômetro entupido, realizou-se a consistência dos dados nas estações selecionadas. Utilizando-se o Excel, foram analisados o comportamento das distribuições de chuvas em todo o intervalo da série, buscando identificar e corrigir aqueles valores que não apresentassem coerência com a realidade, antes de exportá-los para simulação. Da mesma forma foi realizado com os dados de níveis, onde se comparou as oscilações do Rio Taquari nas cidades de Encantado e Muçum para identificar se os mesmos mantinham coerência e sem valores duvidosos, visto que em Estrela, o nível já sofre efeitos de remanso causado pela Barragem Eclusa de Bom Retiro do Sul. O comportamento das chuvas, pode ser visualizado através dos gráficos compreendidos no Apêndice A, que demonstra toda a sua série ajustada para o estudo. Posteriormente os dados de vazões e precipitações foram organizados na extensão HEC-DSSVue, que é um sistema programado para armazenar e trabalhar com eficiência esses dados sequenciais, antes de lançá-los ao HEC-HMS.

Além disto, ao objetivo também de estimar as precipitações ocorridas ao longo da bacia, realizou-se no HEC-HMS uma interpolação espacial pelo inverso da distância, utilizando a informação do centroide de cada bacia em estudo, sendo esta, obtida pelo ArcGIS. Com base nisso, é que foram consideradas pelo software as precipitações representativas ao estudo.

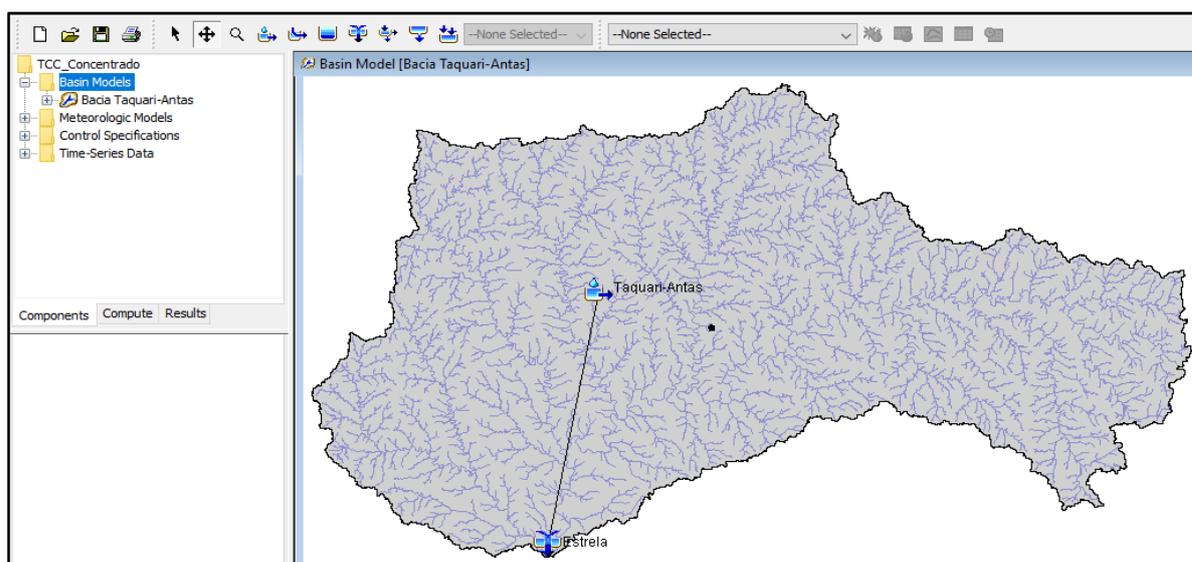
3.3 Especificações dos parâmetros de entrada para o modelo

Para a simulação de vazões e criação do projeto no HEC-HMS, houve a necessidade de inserir o esquema hidrológico dos ambientes de estudo, contendo os seguintes componentes fundamentais:

- Modelos de bacia (Basin Models);
- Modelos meteorológicos (Meteorologic Models);
- Dados de séries temporais (Time-Series Data);
- Especificações de controle (Control Specifications).

Após caracterizada a bacia hidrográfica Taquari-Antas e delimitada novas sub-bacias a partir dos pontos de interesse, foram considerados dois cenários afim de obter e comparar o máximo escoamento em cada um deles até o exutório. No primeiro cenário (Figura 18), buscou-se analisar a região como um todo por meio de precipitação média, atribuindo-se a este, um modelo concentrado contendo dados de distribuição espacial sobre forma de chuva constante em toda bacia até o município de Estrela. Para isto, foram consideradas as características do talvegue principal como sendo desde a nascente em São José dos Ausentes até a sua foz em Estrela pelo Rio Taquari.

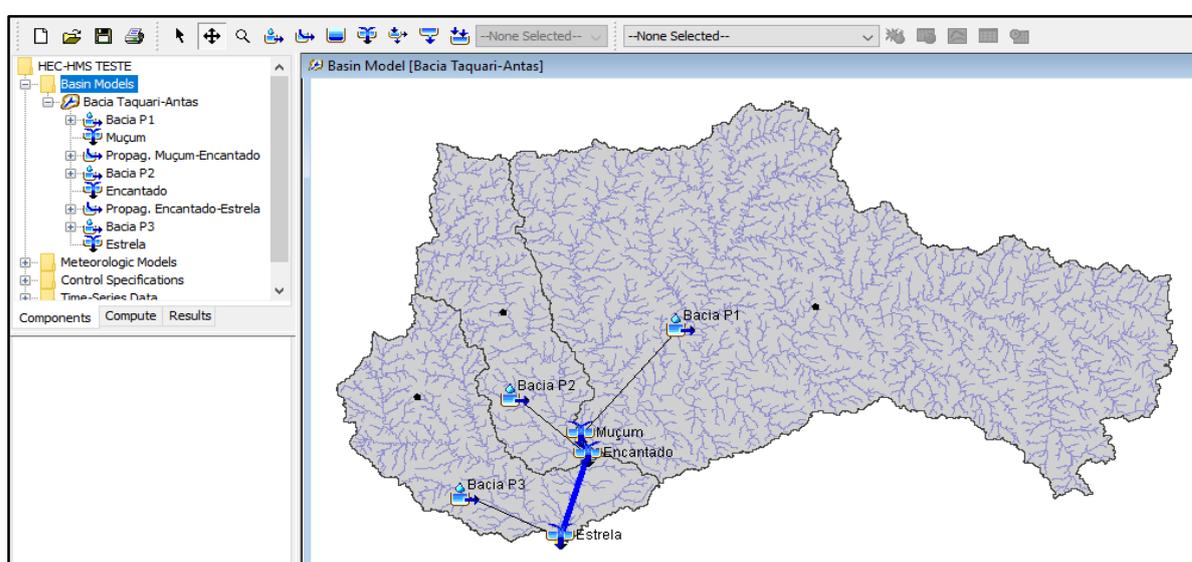
Figura 18 – Elementos hidrológicos da bacia no modelo concentrado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já no segundo (Figura 19), a região foi discretizada em três unidades de gestão conforme a disponibilidade de informações e dados locais, dispondo-se em um modelo semi-distribuído, ao admitir na simulação, a propagação do escoamento até o mesmo ponto em Estrela. Foram considerados como talvegues principais, os maiores comprimentos de rio nas sub-bacias P1, P2 e P3, e as respectivas condições físicas de cada trecho de propagação no Rio Taquari entre Muçum e Encantado e entre Encantado e Estrela.

Figura 19 – Elementos hidrológicos da bacia no modelo semi-distribuído



Fonte: Elaborado pelo autor.

O método empregado e utilizado no software para as condições de chuva e de superfície da bacia foi o SCS, sendo que para a propagação do escoamento, o modelo utilizado foi o Muskingum-Cunge. No SCS, os parâmetros de entrada foram inicialmente definidos com base no cálculo do tempo de retardo, levando em consideração outras variáveis obtidas por geoprocessamento, como por exemplo, o valor de CN e percentual de área impermeável. Já no modelo Muskingum-Cunge, alguns dos parâmetros foram definidos também por geoprocessamento e outros por meio de dados fornecidos pela CPRM e pela empresa Agrosig, como por exemplo, as seções transversais do canal.

Em relação as séries de dados temporais, em cada uma das estações, utilizou-se todas as informações disponíveis de precipitação e vazão, onde após realizado a consistência e preparação dos dados pelo Excel e HEC-DSS, foram

então exportados para processamento no HEC-HMS. Em seguida, nas especificações de controle, foram definidos os intervalos de tempo da precipitação ocorrida. Logo, estabeleceu-se para a simulação os períodos dos eventos selecionados entre os anos de 2015 e 2018, analisando um evento por sete dias, dois eventos por oito dias e um evento por cinco dias consecutivos em intervalos de 1 hora, conforme Figura 20.

Figura 20 – Eventos selecionados para simulação de vazões no HEC-HMS

Name: Evento 1	Name: Evento 2	Name: Evento 3	Name: Evento 4
Description: 2015	Description: 2016	Description: 2017	Description: 2018
*Start Date (ddMMYYYY): 06out2015	*Start Date (ddMMYYYY): 16out2016	*Start Date (ddMMYYYY): 23mai2017	*Start Date (ddMMYYYY): 01out2018
*Start Time (HH:mm): 00:00	*Start Time (HH:mm): 01:00	*Start Time (HH:mm): 00:00	*Start Time (HH:mm): 00:00
*End Date (ddMMYYYY): 13out2015	*End Date (ddMMYYYY): 22out2016	*End Date (ddMMYYYY): 30mai2017	*End Date (ddMMYYYY): 05out2018
*End Time (HH:mm): 23:00			
Time Interval: 1 Hour			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo assim, a simulação se procedeu para condições de tempo e duração de chuva pré-definidos, salientando como limitação deste trabalho, que os efeitos de remanso provocados pela Barragem Eclusa de Bom Retiro do Sul, foram desconsiderados. No entanto, somente com o objetivo de simplificar o estudo e não menosprezando a sua não contribuição, o mesmo é imprescindível e deve ser levado em consideração ao se realizar na prática quaisquer projetos de engenharia, tanto na área hidráulica quanto em hidrologia.

No final, apenas para atribuir aos resultados uma classificação e avaliar o desempenho dos modelos, foi utilizado o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe, conforme apresentado na equação (15).

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_M - E_S)^2}{\sum_{i=1}^n (E_M - \bar{E}_M)^2} \quad (15)$$

Sendo:

E_M = escoamento superficial observado para o evento (mm);

E_S = escoamento superficial simulado para o evento (mm);

$\overline{E_M}$ = média do escoamento superficial observado para o evento (mm).

O mesmo tem como objetivo descrever quantitativamente qual a precisão obtida nas saídas do modelo, desde que hajam dados observados para realizar a comparação das informações resultantes. Existem outros coeficientes de eficiência que são muito empregados em modelos hidrológicos citando, por exemplo, o P_{bias} . Porém, segundo autores como Machado e Vettorazzi (2003), um dos critérios estatísticos mais importantes e precisos para qualificar o ajuste desses modelos é o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe, e por isso se justificou a sua implantação, visto também que é o único coeficiente disposto pelo software HEC-HMS.

Por conseguinte, de acordo com Silva et al., (2008), sugere-se ao coeficiente a seguinte classificação:

Tabela 14 – Classificação do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe

Condição	Avaliação
$C_{NS} \geq 0,75$	Bom
$0,36 \leq C_{NS} < 0,75$	Satisfatório
$< 0,36$	Insatisfatório

Fonte: Elaborado pelo autor.

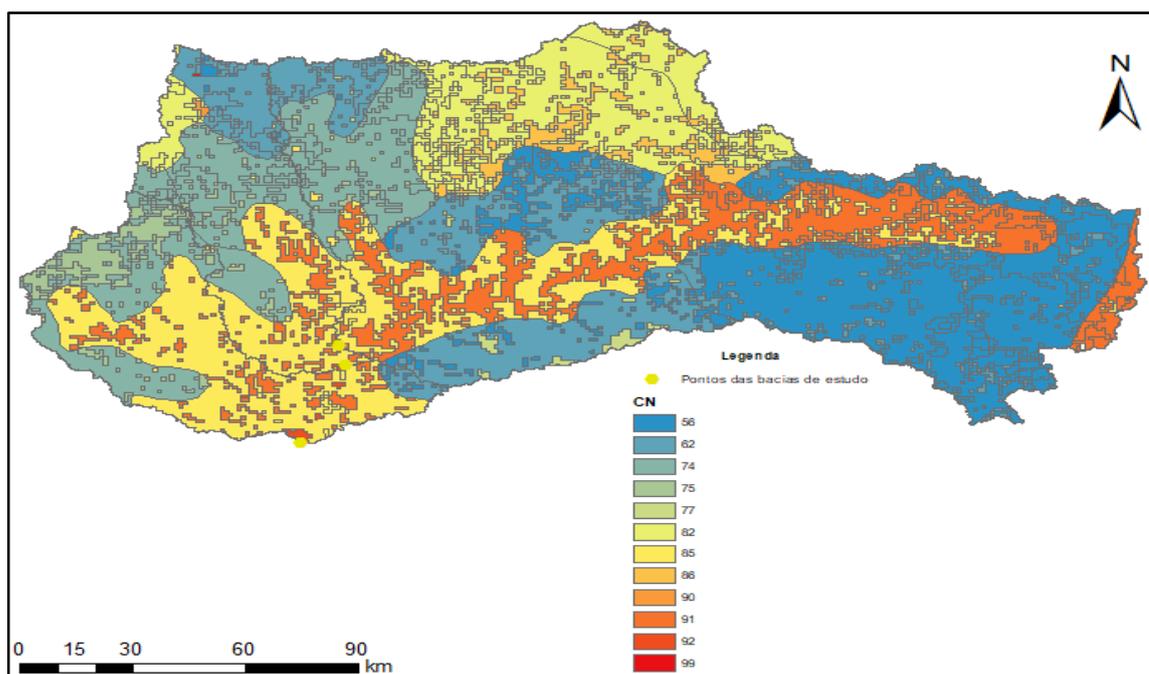
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos, através da análise hidrológica realizada na bacia do Rio Taquari para a simulação de vazões no município de Estrela, considerando as três áreas geradas em ferramenta computacional, analisando-as para os cenários concentrado e semi-distribuído, assim dispostos na metodologia do trabalho. Para isso, os itens de comparação foram definidos em vazões de pico, tempo de ocorrência da máxima descarga e níveis atingidos, prevendo os impactos causados por possíveis inundações.

4.1 Determinação do CN

Conforme já mencionado no capítulo anterior, utilizando ferramentas de geoprocessamento e realizando-se o cruzamento dos mapas de uso e tipo de solo, foi produzido um novo mapa contendo os valores de CN representativos as condições físicas do terreno ao longo de toda área da bacia (Figura 21), de modo que fica bastante perceptível que nos locais próximos ao exutório, há uma variação nos valores entre 82 e 92, caracterizando-se em ambientes pouco permeáveis e com tendência a maiores aumentos no escoamento superficial.

Figura 21 – Valores de CN na bacia do Rio Taquari



Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo, visando o histórico dos incidentes de eventos hidrológicos ocorridos frequentemente nessa região, o parâmetro CN foi ajustado aplicando-se a equação 5 para a condição (III), de solo úmido próximo a saturação (vide p. 34, item 2.2.1). Logo, as correções seguem apresentadas na Tabela 15, onde o CN (II) são os valores médios obtidos em função das características de solo de cada sub-bacia analisada, e o CN (III) os valores corrigidos, levando em consideração que as chuvas dos últimos cinco dias anteriores dos eventos selecionados foram superiores a 53 mm.

Tabela 15 – Correção dos valores de CN

MODELO CONCENTRADO		
Local de estudo	CN (II)	CN (III)
Bacia P3	83,38	92,03
MODELO SEMI-DISTRIBUÍDO		
Local de estudo	CN (II)	CN (III)
Bacia P1	82,25	91,42
Bacia P2	86,08	93,43
Bacia P3	87,02	93,91

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo assim, percebe-se que houve uma grande variação nos valores de CN (II) após corrigidos, principalmente na bacia em análise para o modelo concentrado, resultando em solos com baixas taxas de infiltração de água. Com isso, para a realização da simulação no HEC-HMS, estes ajustes proporcionaram uma maior segurança para a calibração do software, de maneira a não superestimar os valores, ou seja, não realizar uma calibração forçada fora do intervalo possível, fazendo com que essa aplicação representasse as condições mais próximas do cenário real.

4.2 Calibração e simulação do HEC-HMS para o modelo concentrado

Utilizando os parâmetros iniciais de entrada calculados no modelo de transformação chuva-vazão pelo método do SCS, foram realizadas as calibrações de maneira que se atingisse na simulação, os melhores resultados e com comportamento dos hidrogramas semelhantes ao comparado com as vazões observadas. Para isso, o ajuste se procedeu conciliando-se também o coeficiente de

eficiência de Nash-Sutcliffe buscando um valor mais próximo a 1, caracterizando em um perfeito ajuste.

Em relação a área impermeabilizada da bacia Taquari-Antas, admitiu-se o valor fixo de 7% em todos os eventos simulados. Para expressar esse valor, foi considerada a soma das parcelas de área dos grupos de uso “urbano” e “água”, além de mais 10% da área “agro”, tendo em vista que dentro deste último grupo há predominância de atividade pecuária, onde os animais ao se movimentarem pelos campos vão compactando o solo e impermeabilizando gradativamente o mesmo. Outro parâmetro fixado em todos os eventos foi a vazão inicial do hidrograma, que foi obtida por um valor médio das vazões ocorridas em toda a série de dados. Para o tempo de retardo ou *Lag Time*, foi calibrado ajustando-se o valor de acordo com a proximidade do instante ocorrido pelo tempo de pico observado. Já o CN, foi também calibrado realizando-se vários testes, com variações entre 73 e 82, estando os valores um pouco abaixo do valor médio encontrado. Da mesma forma a abstração inicial, que foi ajustada em função do CN adotado e da capacidade máxima de absorção do solo. Esses valores de CN podem ser visualizados na Tabela 16, que denotou do melhor ajuste realizado em relação ao comportamento e eficiência dos hidrogramas.

Tabela 16 – Valores de CN calibrados para o modelo concentrado

	Calculado		Utilizado na simulação
	CN II	CN III	CN calibrado
Evento 1	83,38	92,03	82
Evento 2	83,38	92,03	78
Evento 3	83,38	92,03	73
Evento 4	83,38	92,03	79

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda na fase de calibração do modelo, percebeu-se que mesmo variando a porcentagem de área impermeabilizada e a vazão inicial do hidrograma, o coeficiente de eficiência não variava significativamente e por isso foram fixados. Ao contrário, o CN e os demais parâmetros possuem uma sensibilidade maior nos ajustes, justificando assim as suas alterações. No entanto, vale ressaltar que na maioria dos eventos, o tempo de retardo foi o dado de entrada que recebeu as maiores variações em relação ao valor calculado pelo tempo de concentração,

concluindo que a fórmula de Ven te Chow (equação 7) pode não ter sido a mais adequada para o tamanho da bacia, porém ainda assim, mesmo testando-se outras fórmulas para o tempo de concentração, a equação de Ven te Chow se mostrou para este estudo a mais eficiente, justificando a necessidade de menos variações se aplicadas equações de outros estudiosos. Essas diferenças, são apresentadas conforme Tabela 17 a seguir.

Tabela 17 – Diferenças no tempo de concentração para o modelo concentrado

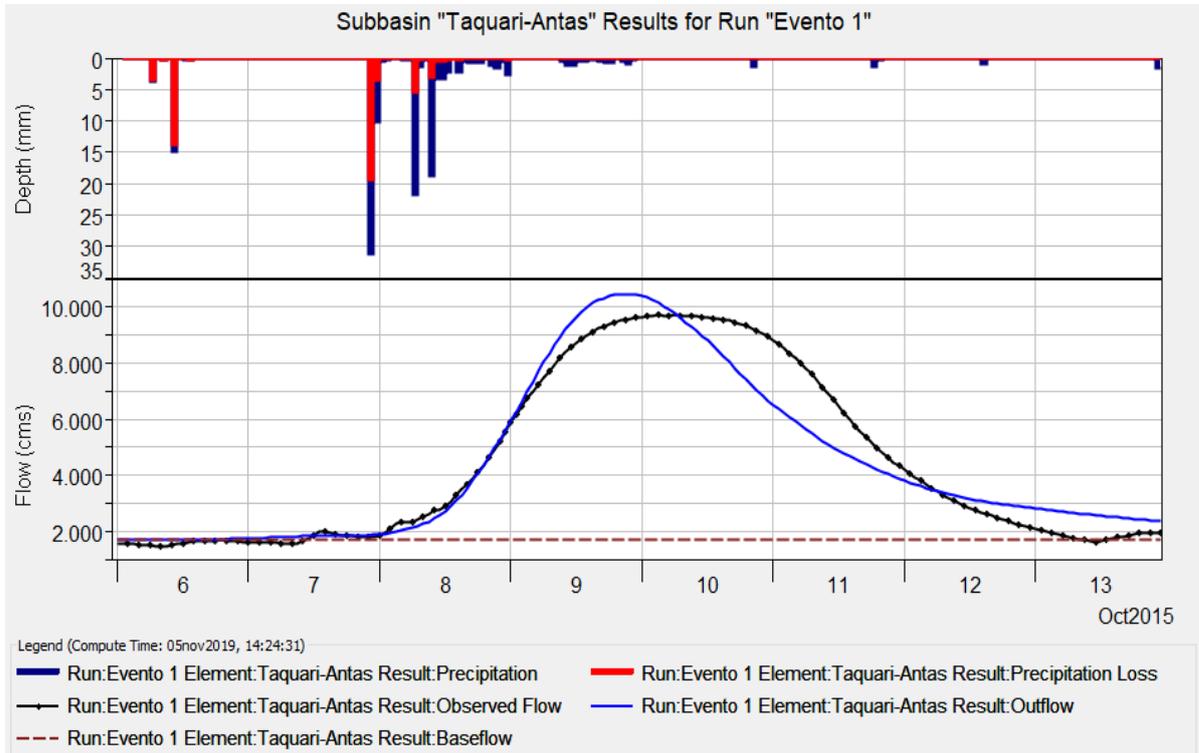
	Calculado		Utilizado na simulação		Diferença do Tc (h)
	Tc (h)	Lag time (h)	Tc (h)	Lag time (h)	
Evento 1	53,06	31,84	59,81	35,89	6,75
Evento 2	53,06	31,84	54,26	32,55	1,2
Evento 3	53,06	31,84	50,09	30,05	2,97
Evento 4	53,06	31,84	58,42	35,05	5,36

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o tempo de concentração, os eventos 1 e 4 foram os que houveram as maiores diferenças, na qual a mais expressiva no evento 1 com dissemelhança de 6,75 horas. Essa diferença pode ser atribuída à intensidade da chuva que ocorreu em cada evento, assim como a sua distribuição espacial, pois na realidade a chuva não se comporta de forma constante ao longo de toda a área da bacia, fazendo com que o valor do tempo de concentração se modifique.

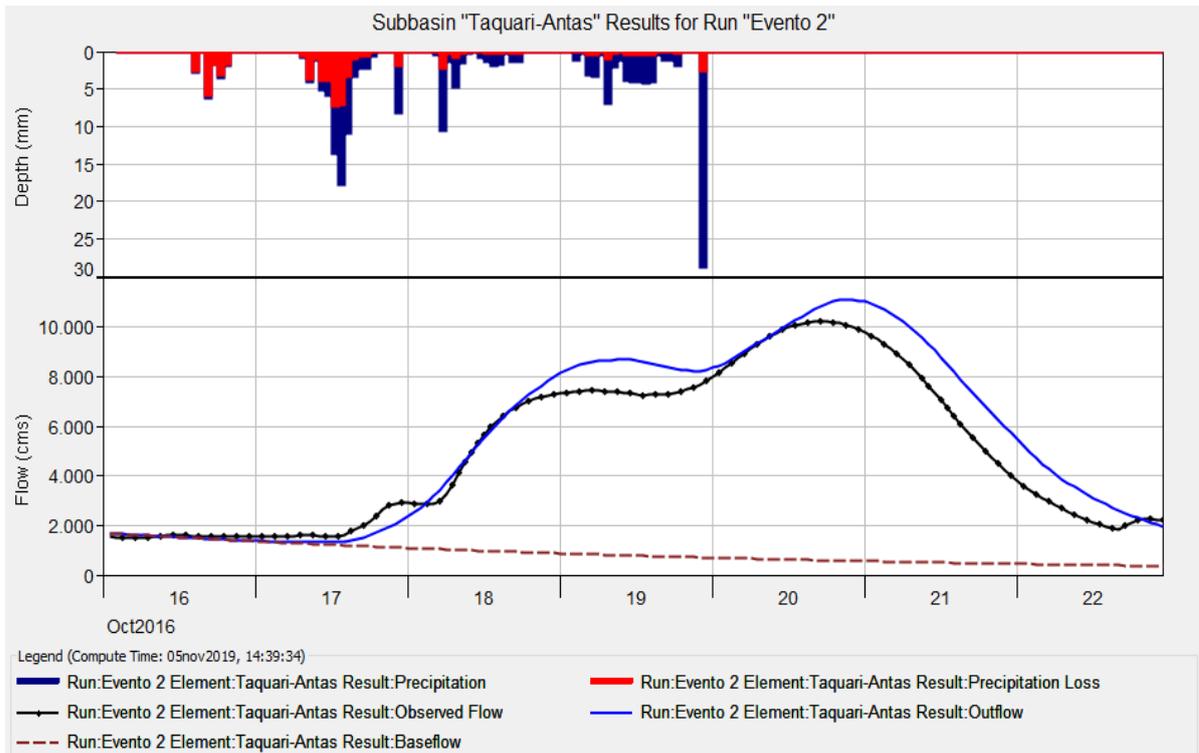
Quanto aos hidrogramas simulados para os quatro eventos, os mesmos seguem ilustrados em ordem nos gráficos a partir da página 67 de acordo com o ano do ocorrido, onde na mesma imagem consegue-se analisar também os hietogramas de precipitação e perdas por infiltração, estando-os assim, representados em conjunto.

Gráfico 5 – Hidrograma do evento 1 para modelo concentrado



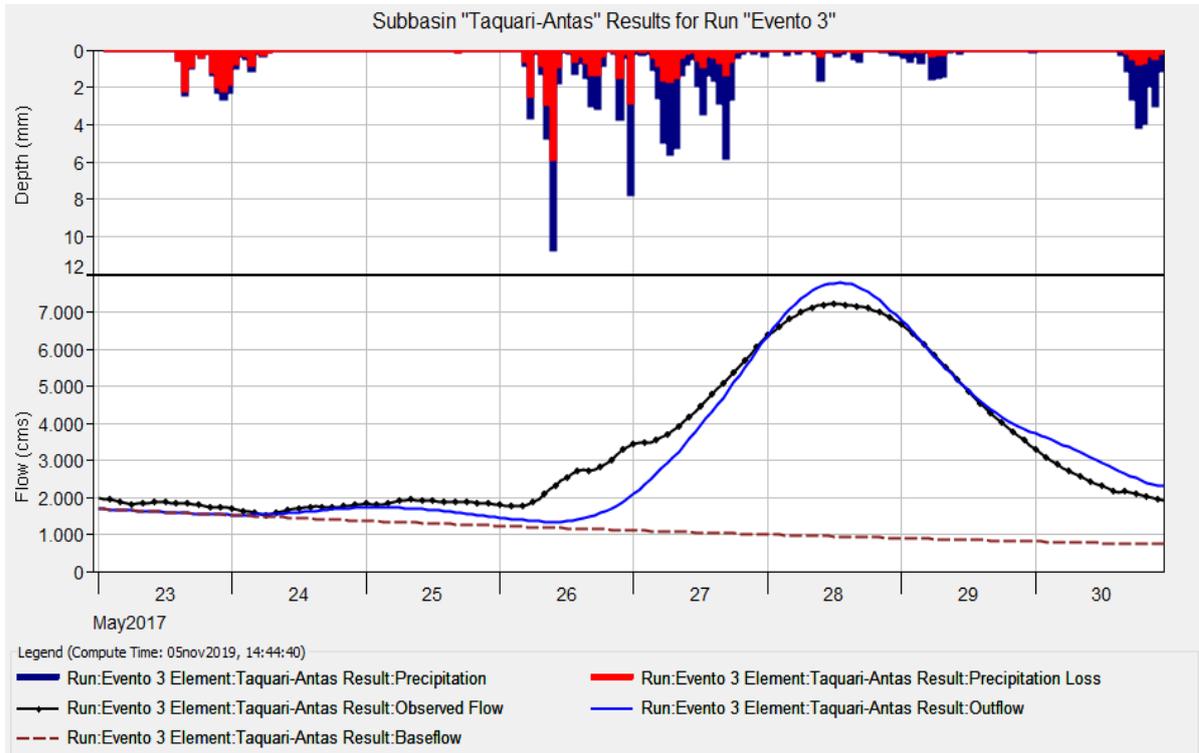
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6 – Hidrograma do evento 2 para modelo concentrado



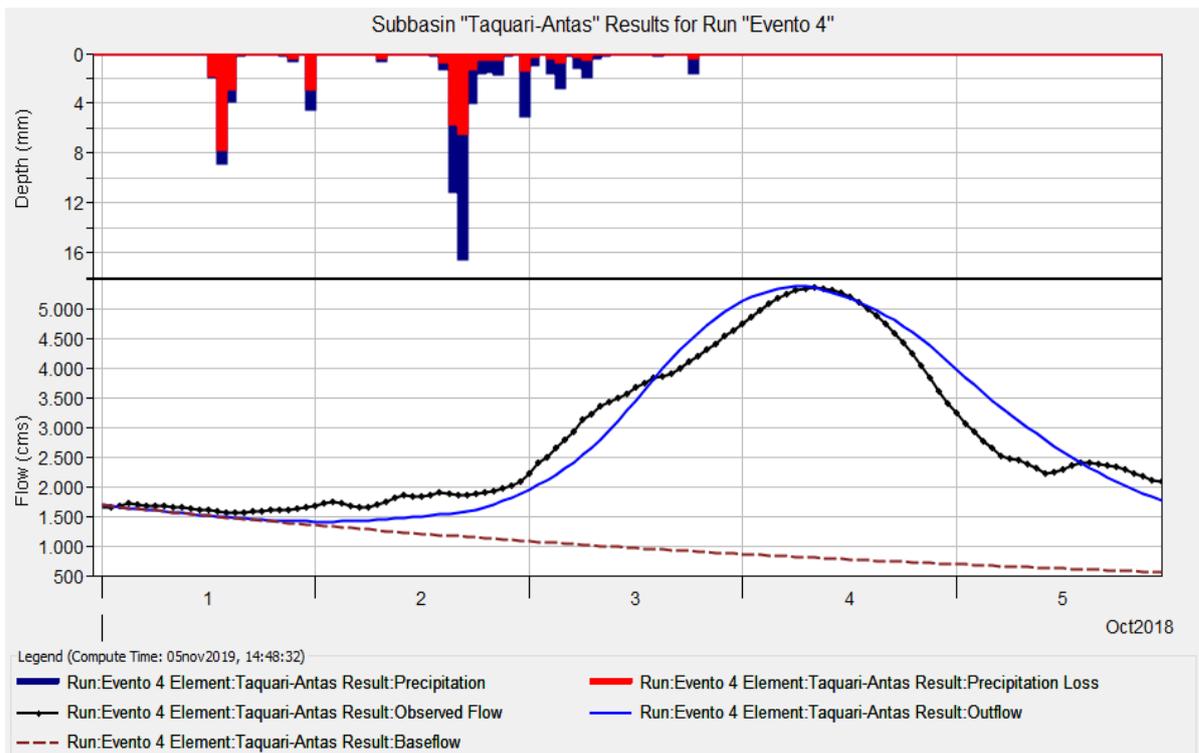
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 7 – Hidrograma do evento 3 para modelo concentrado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 8 – Hidrograma do evento 4 para modelo concentrado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 18 estão resumidos os principais resultados para os eventos simulados no modelo concentrado.

Tabela 18 – Resultados obtidos nos hidrogramas para o modelo concentrado

HIDROGRAMA DO EVENTO 1					
Vazões de pico (m ³ /s)		Diferença (m ³ /s)	Instante da máxima vazão		C _{NS}
Simulada	Observada		Simulada	Observada	
10.469,9	9.715,9	754	09/10/15 às 21h	10/10/15 às 06h	0,92
HIDROGRAMA DO EVENTO 2					
Vazões de pico (m ³ /s)		Diferença (m ³ /s)	Instante da máxima vazão		C _{NS}
Simulada	Observada		Simulada	Observada	
11.098,3	10.226,7	871,6	20/10/16 às 21h	20/10/16 às 17h	0,92
HIDROGRAMA DO EVENTO 3					
Vazões de pico (m ³ /s)		Diferença (m ³ /s)	Instante da máxima vazão		C _{NS}
Simulada	Observada		Simulada	Observada	
7.788,4	7.217,7	570,7	28/05/17 às 13:00	28/05/17 às 12h	0,93
HIDROGRAMA DO EVENTO 4					
Vazões de pico (m ³ /s)		Diferença (m ³ /s)	Instante da máxima vazão		C _{NS}
Simulada	Observada		Simulada	Observada	
5.369,1	5.354,8	14,3	04/10/18 às 06h	04/10/18 às 08h	0,92

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Tabela 18, verifica-se que de todos os eventos simulados, a maior discrepância de vazões foi para o hidrograma do evento 2 com 871,6 m³/s de diferença, ou seja, 8,52%. No mesmo evento também registrou-se a maior quantidade de precipitação e perdas por infiltração, resultando em uma precipitação efetiva de 128,7 mm. Já a menor diferença de vazões ocorreu no hidrograma do evento 4 com 14,3 m³/s, totalizando em 0,27%. Nesses ajustes, o que apresentou o instante mais próximo da vazão de pico, simulando em apenas uma hora depois do ocorrido foi o hidrograma do evento 3 e posteriormente, o do evento 4 com duas horas de antecedência.

Com relação aos sistemas de alerta, as informações do momento de início do evento acabam se tornando as mais importantes na comunicação aos órgãos e defesas civis locais, assim um provável risco de enchente ou inundação pode ser informado com antecedência aos moradores. Portanto, nesse aspecto, o hidrograma que apresenta o melhor resultado é o do evento 1, simulando quase no mesmo instante em que as vazões começam a aumentar, antecipando somente no horário da vazão de pico e no tempo levado para o decaimento da curva acontecer.

Como análise dos resultados obtidos nos eventos simulados em Estrela para o modelo concentrado, os hidrogramas gerados pelo HEC-HMS apresentam de forma geral, uma simulação dos picos de vazões representados na cor azul superiores ao ocorrido, porém com comportamento semelhante, principalmente na fase de ascensão do evento, divergindo mais precisamente no instante em que ocorre a vazão máxima até a recessão do mesmo. Em relação as elevadas vazões encontradas, tal comportamento pode ser atribuído a alguns fatores como, por exemplo, o alto CN considerado ao caracterizar a região como áreas que contribuem para maior escoamento superficial, avaliado aos tipos e usos do solo, assim como a abstração inicial que está diretamente relacionada com o CN, ou seja, visto que conforme a quantidade de perdas, o escoamento direto pode aumentar ou diminuir de forma bastante significativa.

Ainda como justificativa, o efeito de remanso desconsiderado neste estudo pode ter influenciado nos resultados, pois conforme os gráficos dispostos a partir da página 70, percebe-se que o nível máximo atingido pelo Rio Taquari na simulação é inferior ao observado, visto que o remanso proporciona a elevação das cotas para um delta a montante e por consequência a diminuição das vazões. Fato este, ocasionado pela construção da Barragem Eclusa de Bom Retiro do Sul, que segundo informações de defesas civis locais, provoca um remanso de aproximadamente 30 km de extensão, afetando consideravelmente as cidades de Estrela e Lajeado, devido as maiores ondas de cheia.

Contudo, ainda como objeto de resultado, com a intenção de avaliar os possíveis impactos causados pelos níveis do Rio Taquari no período estudado, os gráficos a seguir, exibem o comportamento do mesmo para as cotas de atenção, alerta e inundação atribuídas pela CPRM, conforme simulação realizada e por meio da aplicação da curva chave fornecida também pela CPRM, assim disposta na seguinte equação.

$$Q = a * (h - h_0)^n$$

$$Q = 455,4 * (h - 10)^{1,151} \quad (15)$$

Sendo:

Q = vazão (m³/s);

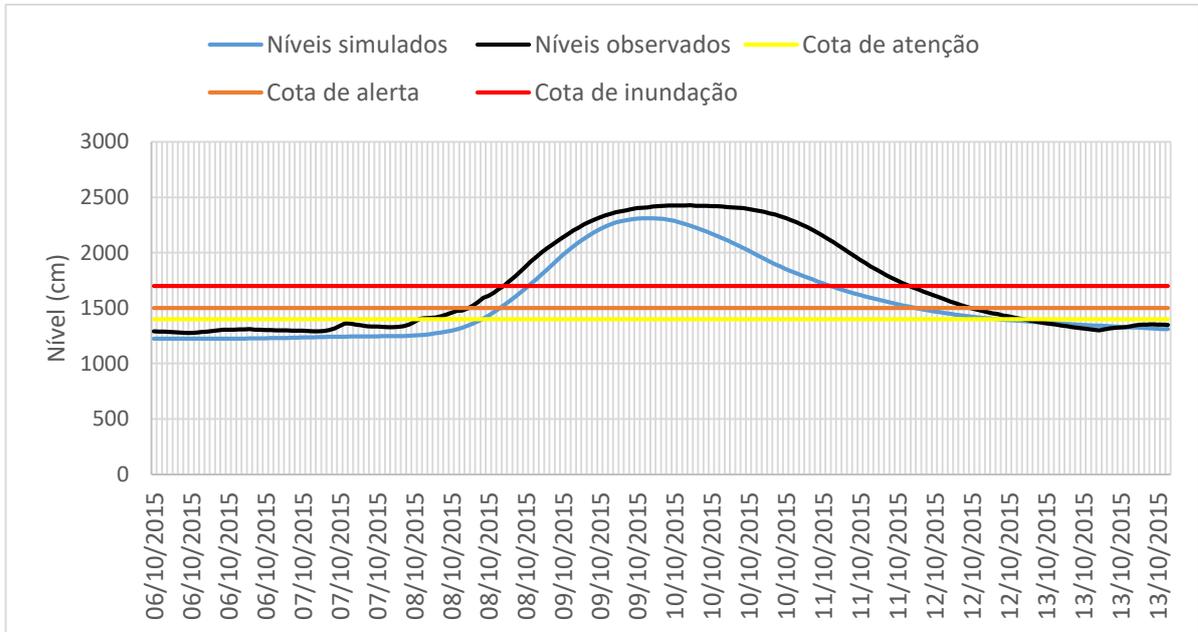
a = constante representativa da seção fluviométrica de interesse;

h = nível da régua correspondente à vazão (m);

h_0 = nível da régua para o qual a vazão é nula (m);

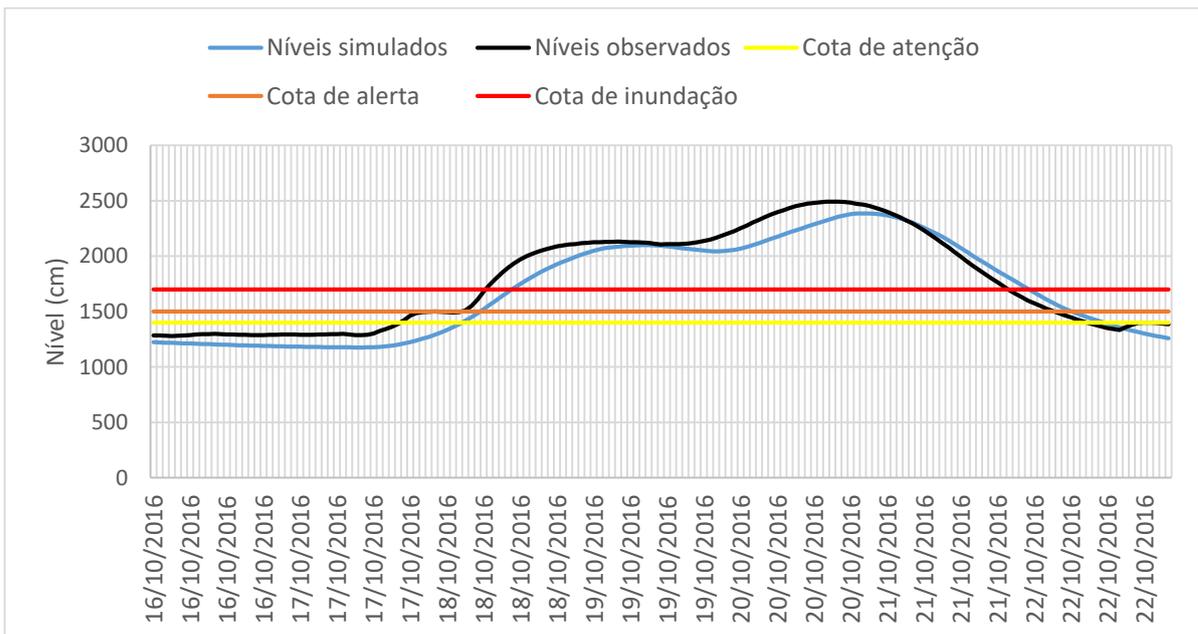
n = constante representativa da seção fluviométrica de interesse.

Gráfico 9 – Níveis d'água do evento 1 para modelo concentrado



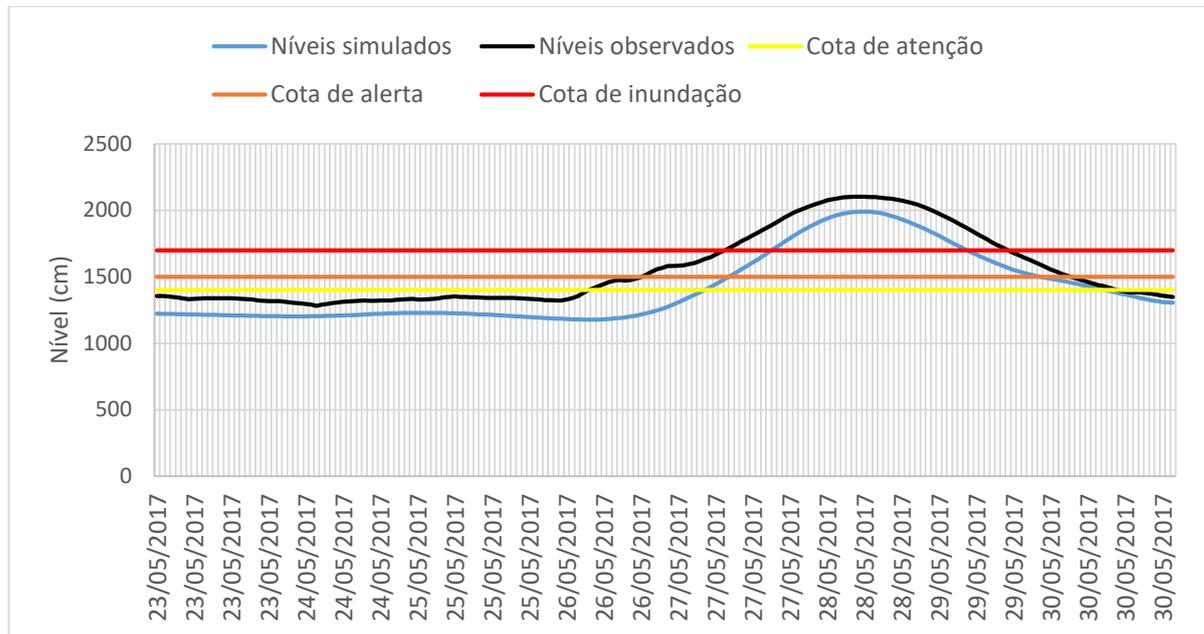
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 10 – Níveis d'água do evento 2 para modelo concentrado



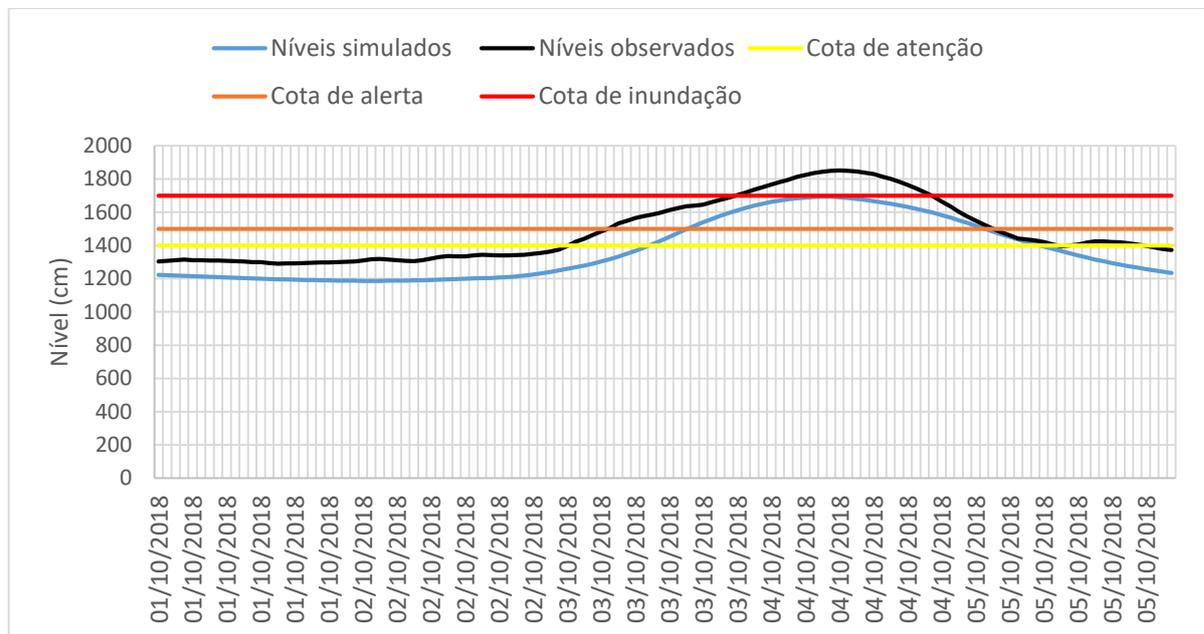
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 11 – Níveis d'água do evento 3 para modelo concentrado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 12 – Níveis d'água do evento 4 para modelo concentrado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, ao observar os gráficos anteriores, mesmo desconsiderando o remanso, os níveis do Rio Taquari para os eventos simulados demonstraram comportamentos compatíveis, sendo que os três primeiros ultrapassaram a cota

mais crítica na cidade de Estrela que de acordo com a CPRM é de 17 metros, da mesma forma que ocorreu com os níveis observados. Somente o evento 4 ficou no intervalo da cota de alerta, porém muito próximo de inundar. Sendo assim, o maior nível computado e representado no Gráfico 10, ficou a 10,86 metros acima do nível de referência de 13 metros do Porto Fluvial de Estrela equivalente à altitude ortométrica.

Este caso, provavelmente fez com que a Defesa Civil e outros órgãos responsáveis, já tivessem que agir em prol da população no suporte àquelas famílias abrigadas em possíveis áreas inundadas. No entanto, o que vale ressaltar é que este tipo de monitoramento, acaba ainda se tornando uma medida mitigadora muito eficaz, pois pode informar a situação com antecedência sobre as variações de níveis do rio no município e em regiões à montante, evitando-se maiores prejuízos.

Deste modo, conforme Tabela 14, pode-se concluir que os resultados obtidos tanto pelos níveis d'água, quanto pelos hidrogramas, apresentaram boa classificação nos coeficientes de eficiência, estando-os todos acima de 75%.

4.3 Calibração e simulação do HEC-HMS para o modelo semi-distribuído

A calibração do modelo semi-distribuído foi realizada utilizando os mesmos critérios estabelecidos no modelo concentrado. A área impermeabilizada da bacia permaneceu o mesmo valor fixo de 7% em todos os eventos simulados, conforme explicado no item anterior. Os demais parâmetros foram ajustados buscando atingir nos hidrogramas o comportamento semelhante ao observado. Os únicos dados de entrada acrescentados nesta simulação foram o comprimento e declividade do trecho propagado, seções transversais de Encantado e Estrela, e o coeficiente de rugosidade de Manning, estimado com base na Tabela 7, arbitrando-se inicialmente o valor de 0,035 conforme características do local.

Neste modelo, durante a fase de calibração, percebeu-se que o coeficiente de Manning possui pouca sensibilidade, causando alterações imperceptíveis nas vazões, desta forma, os parâmetros que tiveram as maiores variações foram o tempo de retardo, CN, abstração inicial e vazão inicial do hidrograma. Vale ressaltar, que em todos os ajustes, procurou-se obter coerência das informações levantadas de forma a não forçar uma simulação que não demonstrasse as condições do

cenário real. Para isso, tanto o CN quanto à abstração inicial foram calibrados se atentando a uma proximidade dos valores calculados e ao mapa de CN gerado.

Os valores de CN podem ser visualizados na Tabela 19, que denotou assim como no modelo concentrado, do melhor ajuste realizado em relação ao comportamento e eficiência dos hidrogramas. Percebe-se que na maioria das vezes, o CN calibrado fica abaixo do intervalo entre CN II e CN III, admitindo que, de fato, em algumas situações, determinadas áreas das sub-bacias possuem solos de maior permeabilidade, podendo ser comprovado ao se analisar a Figura 21. Esta situação reforça que com o passar do tempo (admitindo o intervalo de tempo entre os eventos), as condições físicas do solo se modificam. No entanto, mesmo ficando-os abaixo do intervalo, de maneira geral, a região pode ser caracterizada como uma área com maiores tendências ao aumento do escoamento superficial.

Tabela 19 – Valores de CN calibrados para o modelo semi-distribuído

		Calculado		Utilizado na simulação
		CN II	CN III	CN calibrado
Bacia P1	Evento 1	82,25	91,42	78
Bacia P2		86,08	93,43	80
Bacia P3		87,02	93,91	73
Bacia P1	Evento 2	82,25	91,42	52
Bacia P2		86,08	93,43	93
Bacia P3		87,02	93,91	50
Bacia P1	Evento 3	82,25	91,42	70
Bacia P2		86,08	93,43	85
Bacia P3		87,02	93,91	92
Bacia P1	Evento 4	82,25	91,42	87
Bacia P2		86,08	93,43	86
Bacia P3		87,02	93,91	86

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já o tempo de retardo foi o que mais divergiu do valor inicialmente calculado, possivelmente pelos motivos já citados nos resultados anteriores. Essas diferenças seguem apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Diferenças no tempo de concentração para o modelo semi-distribuído

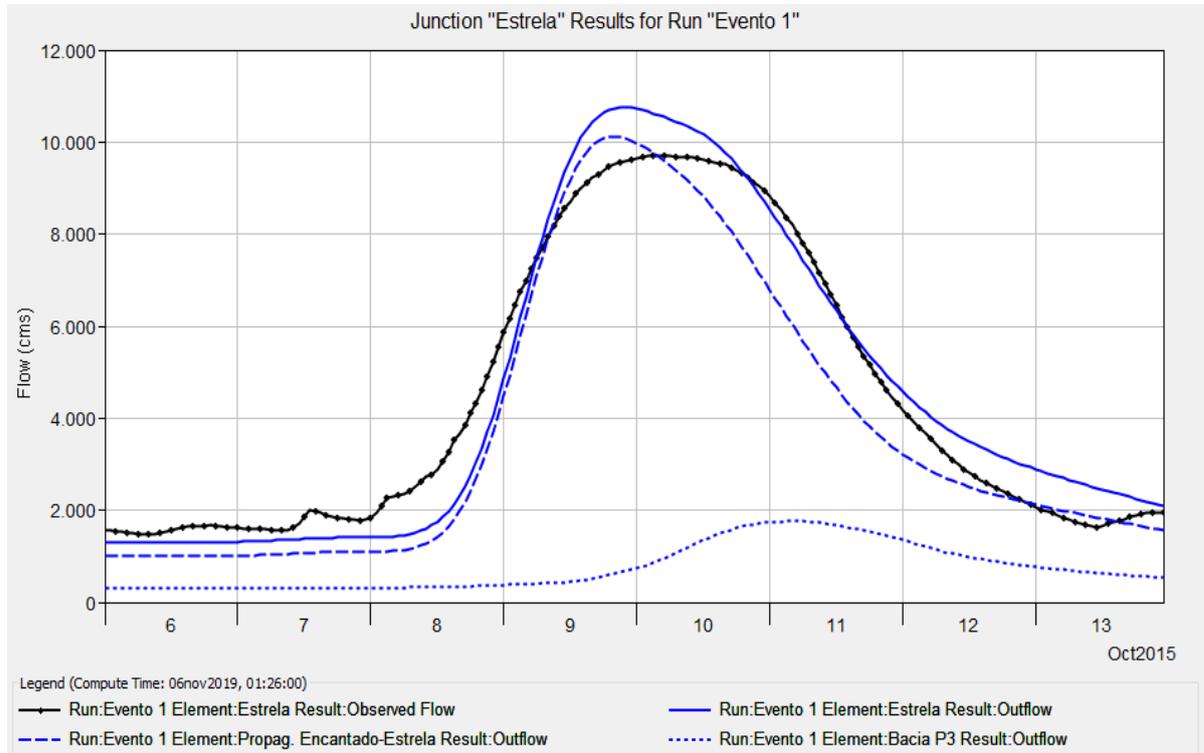
		Calculado		Utilizado na simulação		Diferença do Tc (h)
		Tc (h)	Lag time (h)	Tc (h)	Lag time (h)	
Bacia P1	Evento 1	46,64	27,98	47,15	28,29	0,51
	Evento 2	46,64	27,98	26,87	16,12	19,77
	Evento 3	46,64	27,98	30,48	18,29	16,16
	Evento 4	46,64	27,98	38,82	23,29	23,35
Bacia P2	Evento 1	29,79	17,87	36,43	21,86	6,64
	Evento 2	29,79	17,87	39,21	23,52	9,42
	Evento 3	29,79	17,87	39,21	23,52	9,42
	Evento 4	29,79	17,87	44,76	26,86	14,97
Bacia P3	Evento 1	22,72	13,63	67,44	40,46	44,72
	Evento 2	22,72	13,63	55,50	33,30	32,78
	Evento 3	22,72	13,63	25,77	15,46	3,05
	Evento 4	22,72	13,63	31,33	18,80	8,61

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o tempo de concentração, o evento 1 da bacia P1 foi o único que necessitou de menos ajuste, porém, nos demais houveram diferenças significativas, na qual as mais expressivas nos eventos 1 e 2 da bacia P3 com dissemelhança de 44,72 horas e 32,78 horas, respectivamente. Essa diferença pode ser atribuída pelos mesmos motivos já descritos no modelo concentrado.

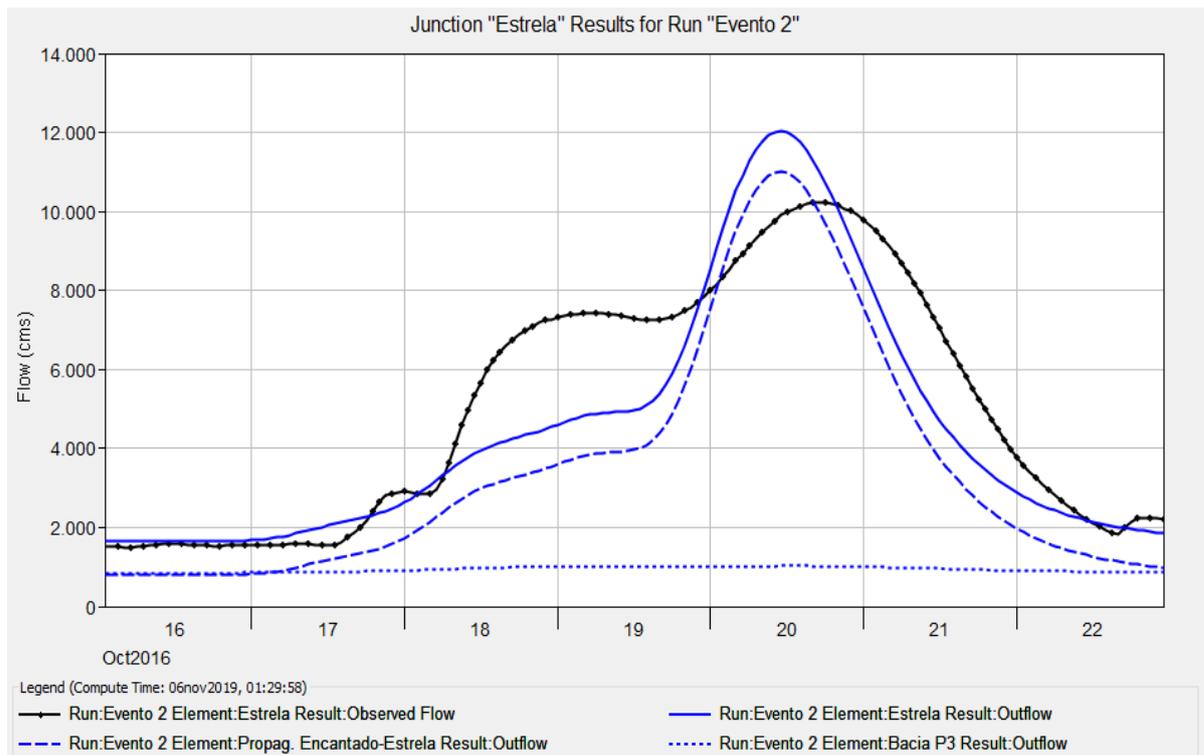
Os hidrogramas gerados com a aplicação do modelo semi-distribuído apresentam, de forma geral, uma simulação dos picos de vazões também superiores ao observado mas com comportamento semelhante, diferenciando-se um pouco no instante da vazão máxima e no tempo levado para o escoamento superficial voltar a decair. Com isso, os hidrogramas para os quatro eventos simulados seguem ilustrados em ordem nos gráficos a partir da página 76, de acordo com o ano do ocorrido. Nos gráficos as vazões observadas são representadas na cor preta, as vazões finais simuladas no exutório para comparação na cor azul, e as vazões simuladas na sub-bacia P3 juntamente com as do trecho propagado entre Encantado e Estrela, em pontilhada e tracejada, respectivamente.

Gráfico 13 – Hidrograma do evento 1 para modelo semi-distribuído



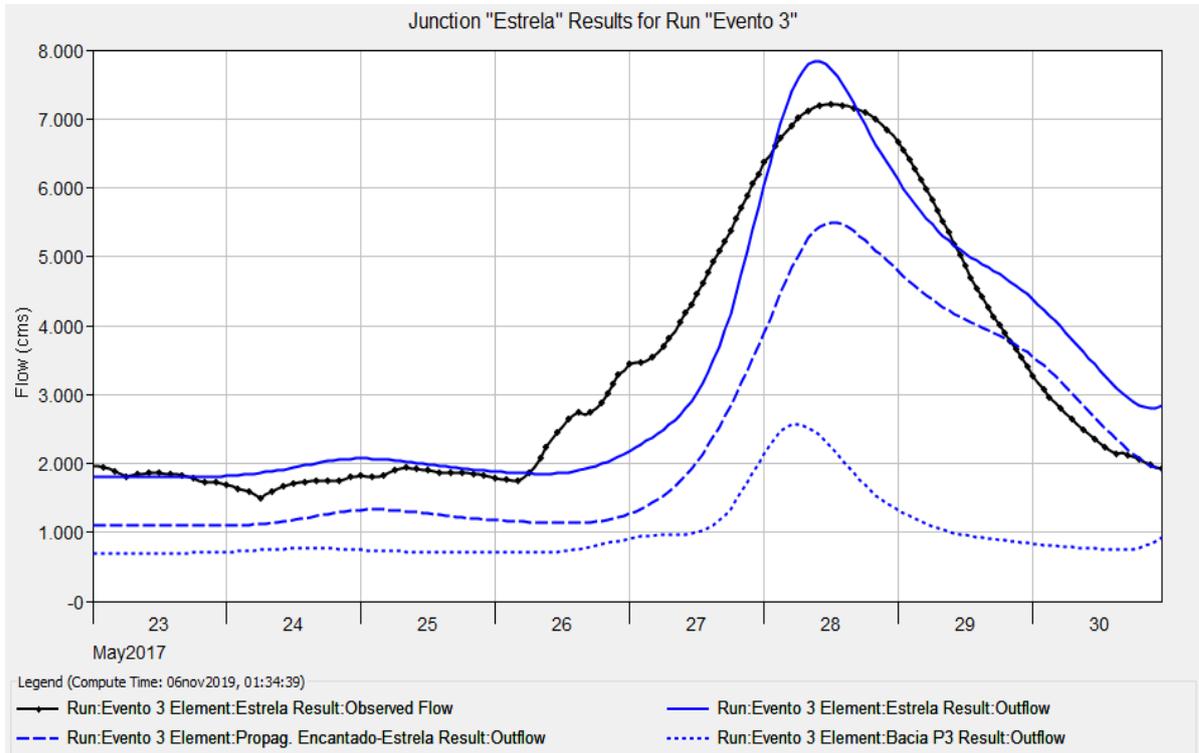
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 14 – Hidrograma do evento 2 para modelo semi-distribuído



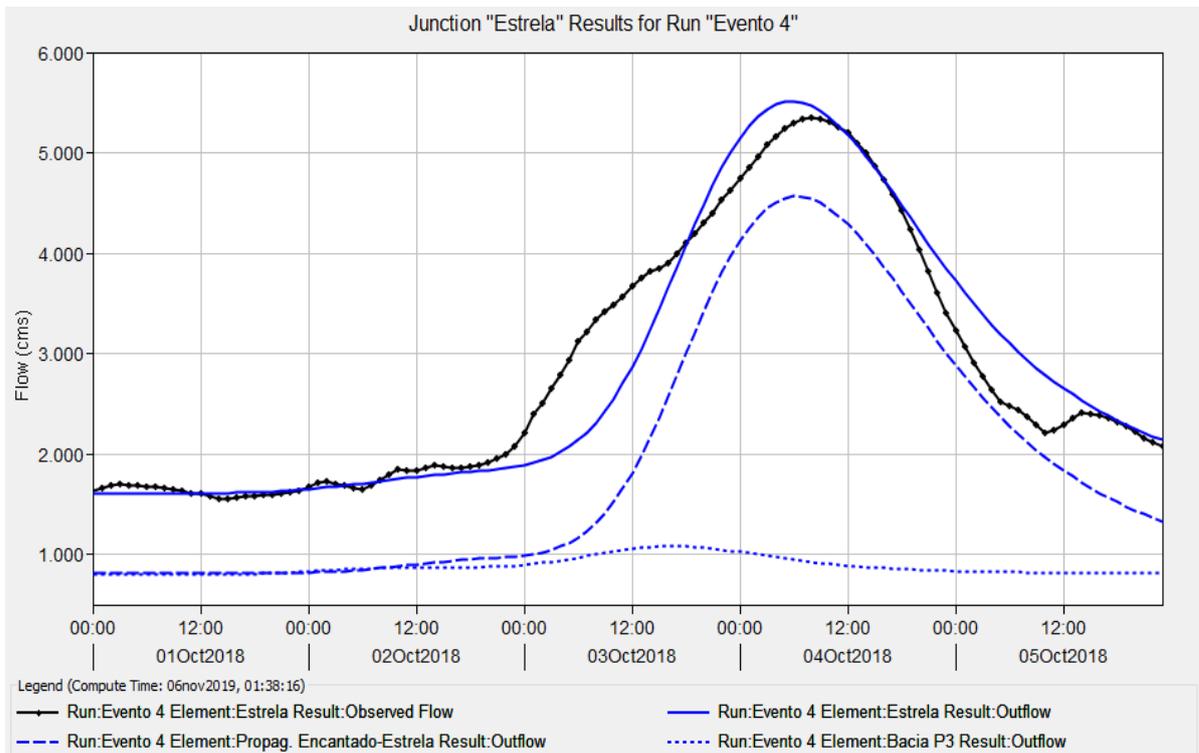
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 15 – Hidrograma do evento 3 para modelo semi-distribuído



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 16 – Hidrograma do evento 4 para modelo semi-distribuído



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 21 estão resumidos os principais resultados para os eventos simulados no modelo semi-distribuído.

Tabela 21 – Resultados obtidos nos hidrogramas para o modelo semi-distribuído

HIDROGRAMA DO EVENTO 1					
Vazões de pico (m ³ /s)		Diferença (m ³ /s)	Instante da máxima vazão		C _{NS}
Simulada	Observada		Simulada	Observada	
10.756,5	9.715,9	1.040,6	09/10/15 às 22h	10/10/15 às 06h	0,95
HIDROGRAMA DO EVENTO 2					
Vazões de pico (m ³ /s)		Diferença (m ³ /s)	Instante da máxima vazão		C _{NS}
Simulada	Observada		Simulada	Observada	
12.023,9	10.226,7	1.797,2	20/10/16 às 11h	20/10/16 às 17h	0,78
HIDROGRAMA DO EVENTO 3					
Vazões de pico (m ³ /s)		Diferença (m ³ /s)	Instante da máxima vazão		C _{NS}
Simulada	Observada		Simulada	Observada	
7.838	7.217,7	620,3	28/05/17 às 10h	28/05/17 às 12h	0,87
HIDROGRAMA DO EVENTO 4					
Vazões de pico (m ³ /s)		Diferença (m ³ /s)	Instante da máxima vazão		C _{NS}
Simulada	Observada		Simulada	Observada	
5.513,0	5.354,8	158,2	04/10/18 às 06h	04/10/18 às 08h	0,92

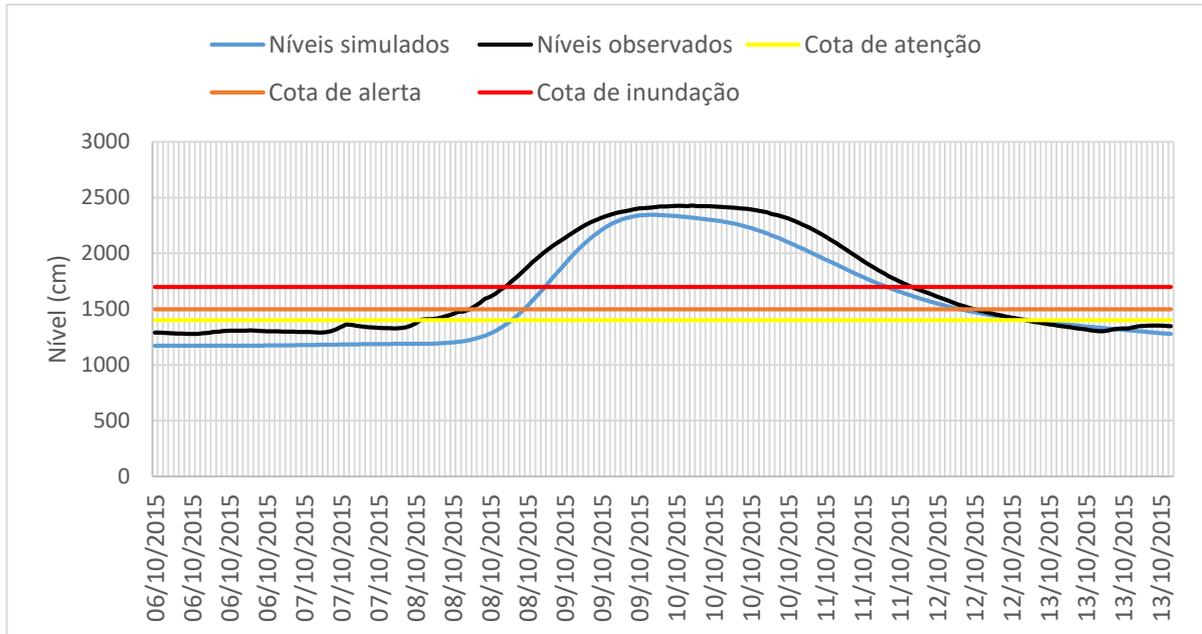
Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Tabela 21 verifica-se que, de todos os eventos simulados, a maior discrepância de vazões foi para o hidrograma do evento 2 com 1.797,2 m³/s de diferença, ou seja, 17,57%. Já a desigualdade menor ocorreu no hidrograma do evento 4 com 158,2 m³/s, equivalente a 2,95%. Nesses ajustes, os que apresentaram o instante mais próximo da vazão de pico, simulando em duas horas depois do ocorrido foram os hidrogramas dos eventos 3 e 4.

Cabe salientar que para aplicação em sistemas de alerta, os melhores resultados obtidos pelo software foi para os hidrogramas dos eventos 1 e 4, onde percebeu-se que o aumento das vazões observadas acontecem momentos antes do simulado. Além disso, a curva simulada em azul se mantém num comportamento similar a observada, permanecendo por mais tempo até o decaimento das vazões. Estas informações são de grande valia para a comunicação com antecedência de um provável risco de enchente ou inundação, àquelas pessoas abrigadas em áreas ribeirinhas.

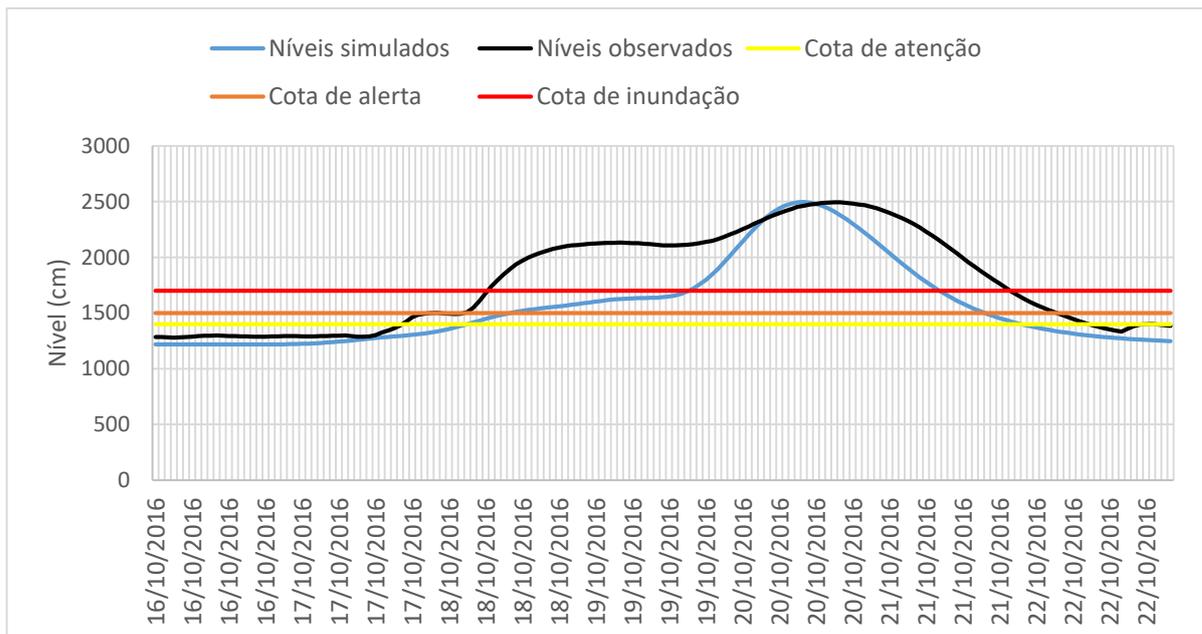
Para a comparação entre os valores de níveis medidos no local e os valores resultantes através das vazões simuladas foram construídos os gráficos a seguir, onde se indica também as cotas de atenção, alerta e inundação.

Gráfico 17 – Níveis d'água do evento 1 para modelo semi-distribuído



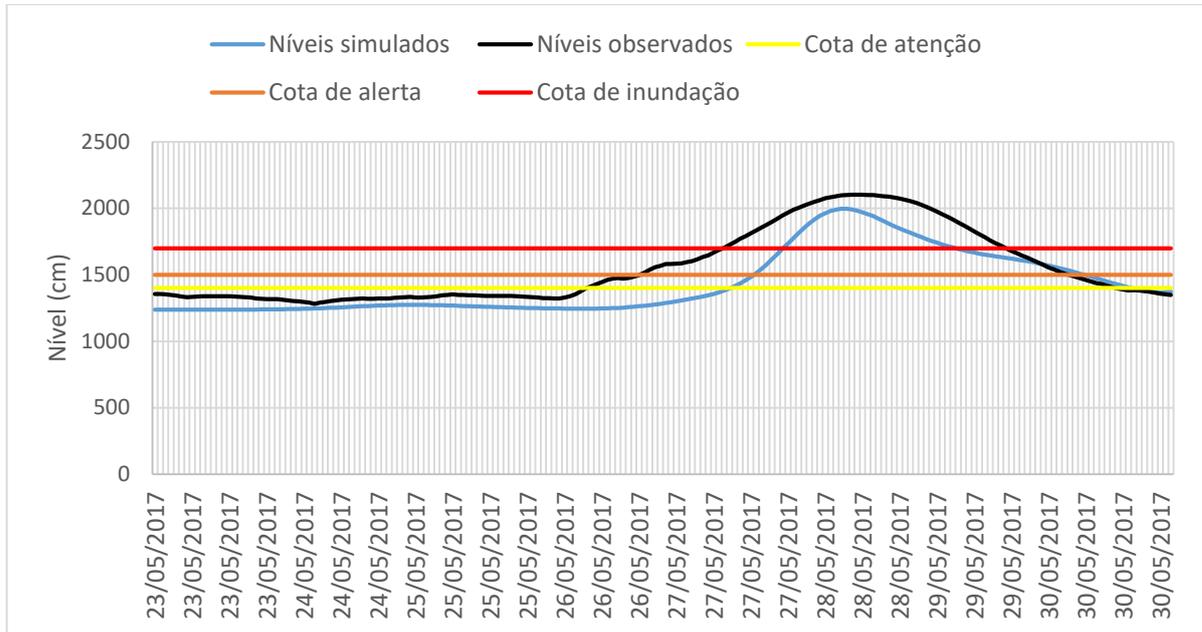
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 18 – Níveis d'água do evento 2 para modelo semi-distribuído



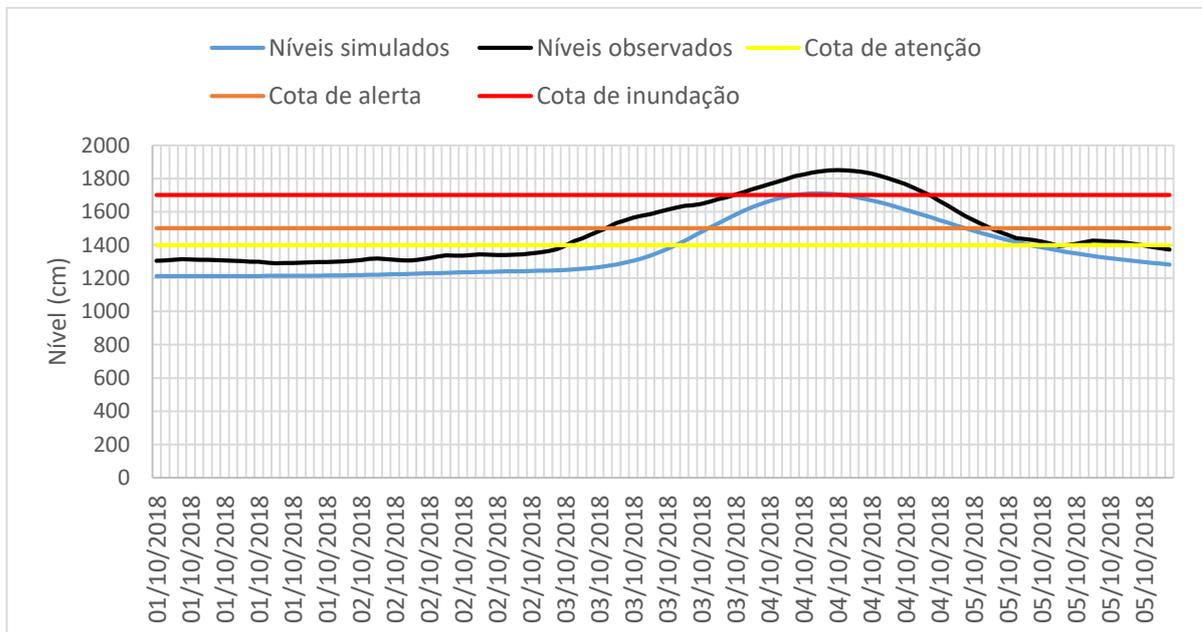
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 19 – Níveis d'água do evento 3 para modelo semi-distribuído



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 20 – Níveis d'água do evento 4 para modelo semi-distribuído



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao observar os gráficos anteriores, percebe-se que em todos os eventos os níveis atingem a cota mais crítica de Estrela de 17 metros, ou seja, da mesma forma que ocorreu com os níveis observados e com a simulação do modelo concentrado.

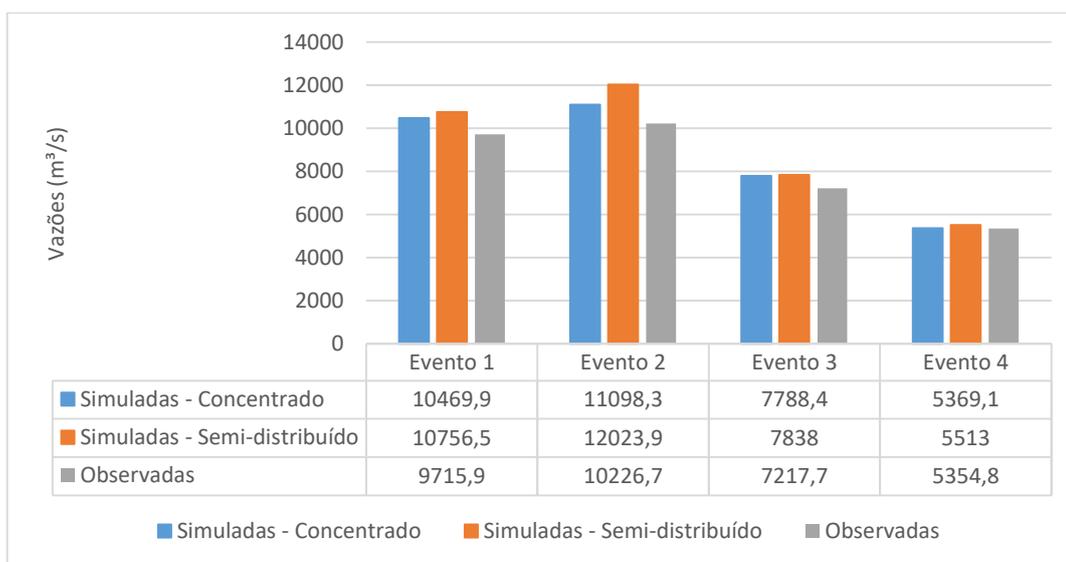
Sendo assim, o maior nível computado e representado no Gráfico 18, ficou a 11,95 metros acima do nível de referência de 13 metros do Porto Fluvial de Estrela equivalente à altitude ortométrica.

Deste modo, conforme Tabela 14, pode-se concluir que os resultados obtidos tanto pelos níveis d'água, quanto pelos hidrogramas, apresentaram também boa classificação nos coeficientes de eficiência, estando-os todos acima de 75%.

4.4 Comparação de resultados dos modelos

Apenas com o propósito de comparar os resultados obtidos nos dois modelos, as respectivas vazões de pico simuladas e observadas seguem apresentadas no Gráfico 21.

Gráfico 21 – Comparativo das vazões de pico simuladas e observadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se no Gráfico 21 que em todos os eventos simulados as vazões observadas foram menores, obtendo as variações maiores no evento 2, e variações menores no evento 4. Essas diferentes variações podem ser atribuídas em decorrência das condições físicas do local, que se modificam ao longo do tempo, alterando valores de parâmetros do modelo, assim como a frequência e intensidade da chuva ocorrida no período. Além do mais, as simulações dos modelos concentrado e semi-distribuído obtiveram maiores divergências apenas no evento 2, porém ainda assim não muito distante os valores encontrados. Nos demais,

apresentaram resultados bem próximos, fazendo com que, de maneira geral, estejam todas adequadas com o cenário real.

5 CONCLUSÃO

Considerando a importância da previsão de vazões na bacia do Rio Taquari, o objetivo deste trabalho foi realizar uma análise das vazões ocorridas em diferentes períodos nos últimos anos, através de simulações com a aplicação do software HEC-HMS.

Sendo assim, os resultados obtidos expressam em seus valores a consequência do que foi atribuído em cada parâmetro dos modelos, sendo que em alguns deles, foram admitidas simplificações como por exemplo, o CN e o n de Manning. No CN, o que foi considerado na calibração são providos de valores médios, ou seja, de acordo com maneira em que os tipos e usos do solo foram classificados. Da mesma forma para a rugosidade, em que o valor foi arbitrado em condições de análise espacial de visualização. No entanto, esses valores podem variar, fazendo com que para projetos de grandes obras hidráulicas, por exemplo, seja aconselhado uma análise mais detalhada com inspeções *in loco* e levantamentos topográficos, garantindo ainda mais segurança nos resultados.

Com relação a calibração do modelo, o tempo de concentração calculado pela fórmula de Ven te Chow pode não ter sido o mais adequado em função do tamanho da bacia, devido à necessidade de maiores ajustes no tempo de retardo, porém, ainda assim foi a que demonstrou maior eficiência ao se testar outras equações, o que se justificou a sua aplicação. Nas análises das vazões de pico obtidas em Estrela, em todos os eventos resultaram valores maiores ao observado, visto que já era esperado ao identificar a região como áreas pouco permeáveis e com elevados valores de CN, caracterizando-se para a contribuição de maiores aumentos no escoamento superficial. Além do mais, o efeito de remanso, desprezado nesse estudo, pode também ter influenciado os resultados, pois devido à construção da Barragem Eclusa de Bom Retiro do Sul, os níveis do Rio Taquari sofrem elevações para cotas à montante, influenciando a relação cota vazão.

Portanto, compreende-se que a simulação processada no HEC-HMS para os dois modelos, apresentaram através dos hidrogramas resultados satisfatórios, demonstrando bons ajustes nas curvas simuladas, especialmente no modelo concentrado, que atingiu maior precisão na calibração, e obtendo melhor ajustes nas proximidades do instante de ocorrência da máxima vazão. Além do mais, o comportamento da variação mostrou maior semelhança em relação as vazões

observadas, favorecendo a estimativa dos níveis para as previsões de inundações. Já o modelo semi-distribuído se difere um pouco nesses aspectos, atrasando o tempo em que as vazões começam a aumentar, porém não se pode afirmar que a simulação não esteja adequada, porque ainda podem haver falhas nas séries de vazões observadas que não tenham sido percebidas.

De acordo com os níveis, em todos os eventos simulados se apresentou nos gráficos cenários críticos, pois ultrapassaram a cota de inundação de Estrela de 17 metros, ficando somente abaixo em um evento, porém muito próximo de inundar. Esta situação, provavelmente fez com que moradores abrigados em áreas ribeirinhas já tivessem que se retirar de suas casas, juntamente com a ação da Defesa Civil e outros órgãos responsáveis pelo sistema de alerta, tornando assim, uma medida mitigadora muito eficiente na redução de prejuízos, ao proporcionar o anúncio da informação com antecedência sobre as variações de níveis do Rio Taquari. Ainda assim, devido aos últimos acontecimentos, percebe-se que o mês de outubro é a época do ano em que ocorrem as maiores frequências de chuvas, ocasionando quase sempre inundações nessa região.

Deste modo, pode-se concluir que os objetivos do estudo foram atingidos, nos quais em todas as simulações os coeficientes de eficiência apresentaram valores altos, em sua grande maioria, maiores que 90% caracterizando-se em um ajuste adequado.

6 SUGESTÕES

Em trabalhos futuros, sugere-se que, para melhores precisões nos resultados, seja realizado uma discretização da área de estudo em mais sub-bacias, trabalhando como um modelo distribuído citando, por exemplo, a consideração das sete sub-bacias existentes na bacia hidrográfica do Taquari-Antas. Além disto, aplicar também outros modelos hidrológicos que admitem em seus cálculos o efeito de remanso ocorrido em Estrela, assim como o desafio de simular as vazões no verdadeiro exutório da bacia no município de Taquari.

Outra recomendação seria a seleção de mais estações pluviométricas distribuídas em outros pontos não contemplados no presente estudo na região da bacia, contendo uma maior quantidade de dados de precipitação para verificar a influência na transformação chuva-vazão.

Sugere-se também a realização de um mapeamento de inundações para aquelas regiões que ainda não possuem este tipo de estudo.

REFERÊNCIAS

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. **Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação.** Porto Alegre: ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1993.

BOLDRIN, R. S. **Avaliação de cenários de inundações urbanas a partir de medidas não estruturais de controle: Trecho da bacia do Córrego do Gregório, São Carlos - SP.** São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, 2005.

BOLLMANN, H. A. **Relação da densidade populacional sobre variáveis de qualidade físico-química das águas superficiais em microbacias hidrográficas urbanas sem cobertura sanitária em Porto Alegre - RS.** Porto Alegre: UFRGS / IPH – Instituto Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003.

CASTRO, Antônio Luiz Coimbra de. **Glossário de Defesa Civil: Estudos de Riscos e Medicina de Desastres.** 5ª edição. Brasília: Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil - SEDEC, 2009.

CASTRO, Antônio Luiz Coimbra de. **Manual de Desastres: Desastres Naturais.** Vol. I. Brasília: Ministério da Integração Nacional, p. 173, 2003.

CEPED. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012.** Secretaria Nacional de Defesa Civil, p. 126, 2013.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais.** São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia: para engenharia e ciências ambientais.** Porto Alegre: ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo Hidrologia.** Porto Alegre: UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 6, p. 95-118, 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem**. Rio de Janeiro: IPR - 715, p. 133, 2005.

FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; PAIVA, R. C. **Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 4, p. 137-147, 2014.

FERRI, G.; TOGNI, A. C. **A história da bacia hidrográfica Taquari-Antas**. Lajeado: Univates, 2012.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL - FEPAM. **Qualidade das águas da bacia hidrográfica do Rio das Antas e Rio Taquari**. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_taquari_antas/taquariantas.asp>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2019.

GONTIJO, N. T. **Avaliação das relações de frequência entre precipitações e enchentes raras por meio de séries sintéticas e simulação hidrológica**. p. 175, 2007.

GOURLEY, J. J.; VIEUX, B. E. **A method for identifying sources of model uncertainty in rainfall-runoff simulations**. Journal of Hydrology, vol. 327, p. 68-80, 2006. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 16 de abril de 2019.

JACOBUS, J. R. R. **Análise hidrológica e hidráulica do projeto para controle de cheias no Arroio Lambari - Município de Rondinha - Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS / IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2014.

KOBIYAMA, Masato. **Curso de capacitação em hidrologia e hidrometria para conservação de mananciais**. Florianópolis, 2009.

LEAL, D. A. et al. **Determinação da precipitação efetiva em uma bacia hidrográfica experimental**. Uberlândia: UFU - Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

LEOPOLD, L. B. **Hydrology for urban land planning - a guidebook on the hydrologic effects of urban land use**. p. 18, 1968.

LIMA, D. F. B. DE; REMPEL, C.; ECKHARDT, R. R. **Análise ambiental da bacia hidrográfica do Rio Taquari - Proposta de zoneamento ambiental**. Londrina: Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Geociências, v. 16, n. 1, 2007.

MACHADO, R. E. & VETTORAZZI, C. A. **Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins**. São Paulo. R. Bras. Ci. Solo, 27:735-741, 2003.

MAGNA ENGENHARIA LTDA. **Avaliação quanti-qualitativa das disponibilidades e demandas de água na bacia hidrográfica do Taquari-Antas**. Porto Alegre: 1997. Relatório técnico n 1.t 1-2.

MARINHO, G. M. F. et al. **Modelos Hidrológicos: Conceitos e Aplicabilidade**. Revista de Ciências Ambientais, Canoas - RS, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

MIGUEZ, M.; VERÓL, A.; REZENDE, O. **Drenagem Urbana: Do projeto tradicional à sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. Curitiba: UFPR - Universidade Federal do Paraná, 2005.

PAIVA, J. B. D. DE; PAIVA, E. M. C. D. DE. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001.

PERES, C. B. **Análise da variação dos hidrogramas de cheia na bacia do Córrego Grande**. Florianópolis: UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

PMPA/IPH, Prefeitura Municipal de Porto Alegre/Instituto de Pesquisas Hidráulicas. **Plano diretor de drenagem urbana: Manual de drenagem urbana**. Porto Alegre: UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

POMPÊO, C. **Drenagem Urbana Sustentável**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 5, n. 1, p. 15-23, 2016.

PORTELA, M. M. **Modelação hidrológica**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2006.

RECKZIEGEL, B. W. **Levantamento dos desastres desencadeados por eventos naturais adversos no estado do Rio Grande do Sul no período de 1980 a 2005**. Santa Maria: UFSM - Universidade Federal de Santa Maria, 2007.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. **Classificação hidrológica de solos brasileiros para estimativa da chuva excedente com método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos parte 1: classificação**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 4, p. 5-18, 2005.

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.

SOUZA, R. M. DE; CRISPIM, D. C.; FORMIGA, K. T. M. **Estudo comparativo entre os modelos SWMM e HEC-HMS para simulação de escoamento superficial - Caso de estudo bacia do Córrego Samambáia**. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, 2012.

TOMAZ, P. **Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais**. São Paulo: Editora Navegar, n. 2, p. 475, 2002.

TOMAZ, P. **Curso de Manejo de Águas Pluviais**. São Paulo: Plínio Tomaz, 2009.

TUCCI, C. E. M. **Água no meio urbano**. Porto Alegre: UFRGS / IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, p. 1-40, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Drenagem Urbana**. São Paulo: ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v. 55, n. 4, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Escoamento Superficial**. Porto Alegre: UFRGS / ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2014.

TUCCI, C. E. M. **Gerenciamento da Drenagem Urbana**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 7, n. 1, p. 5-27, 2001.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS / ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2009.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

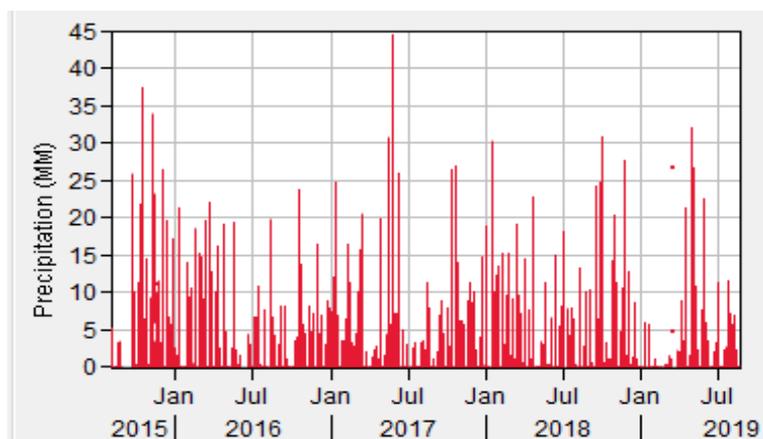
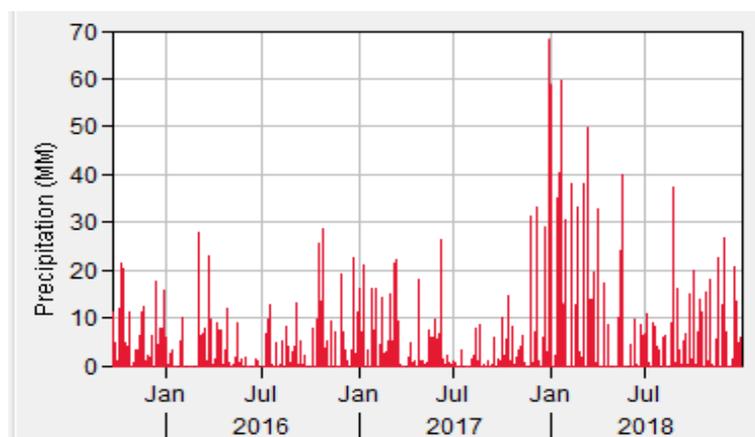
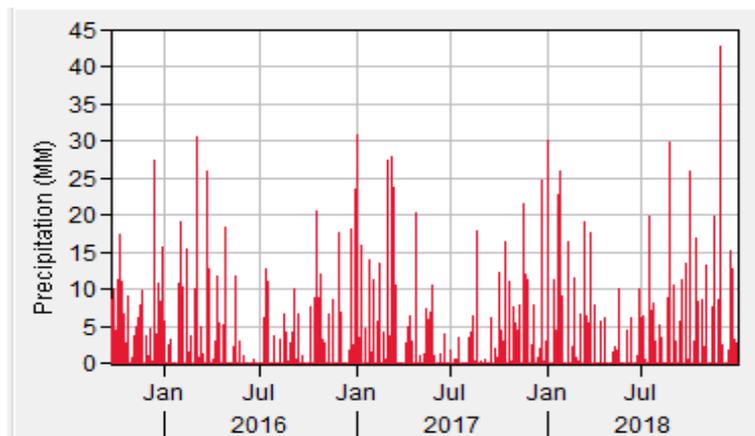
U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS - USACE. **HEC-HMS**. Versão 4.3. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>>. Acesso em: 06 de abril de 2019.

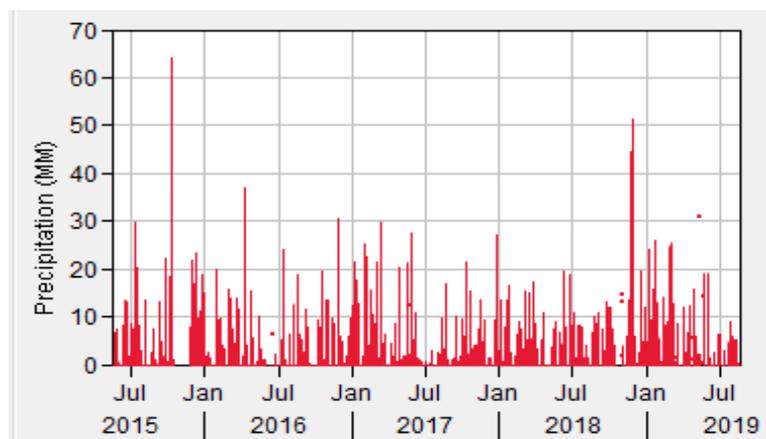
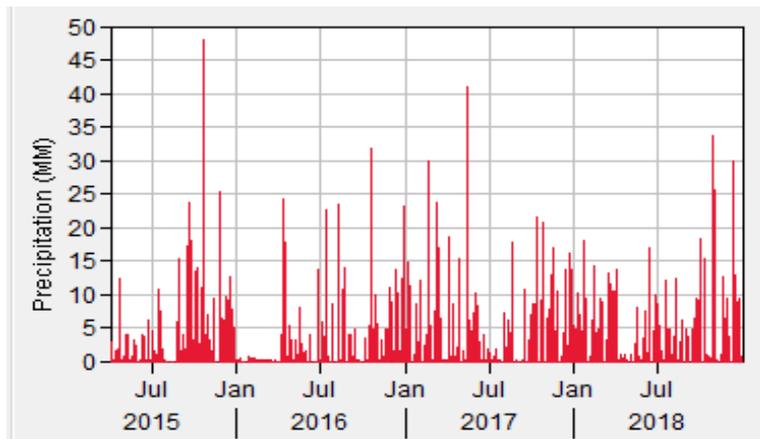
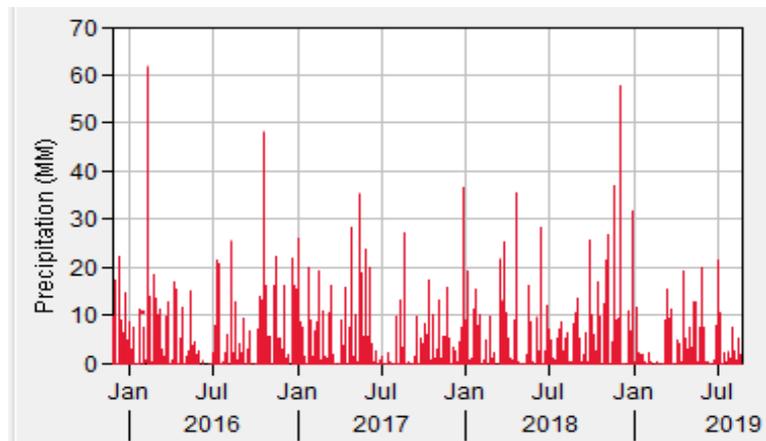
URBONAS, B.; STAHLRE, P., 1993. **Stormwater Best Management Practices and Detention**, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 450p.

VESTENA, L. R. **A importância da hidrologia na prevenção e mitigação de desastres naturais**. *Ambiência*, v. 4, n. 1, p. 151-162, 2008.

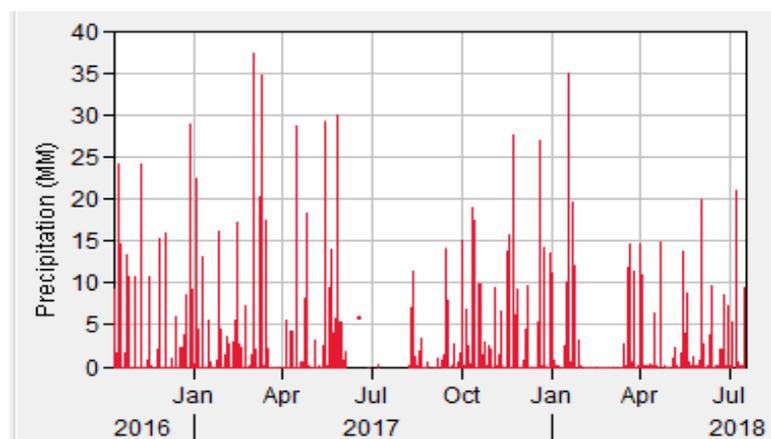
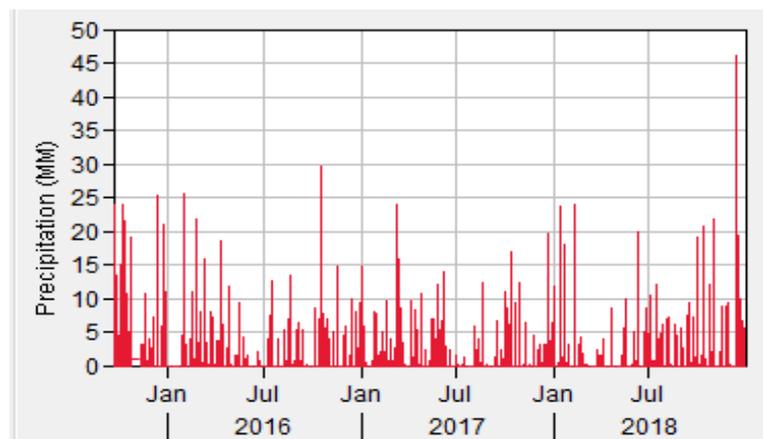
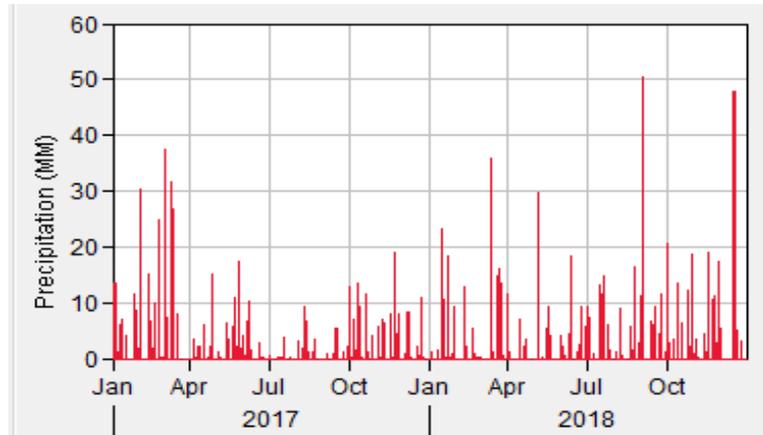
APÊNDICE A – SÉRIES PLUVIOMÉTRICAS DAS ESTAÇÕES DISTRIBUÍDAS PELA BACIA

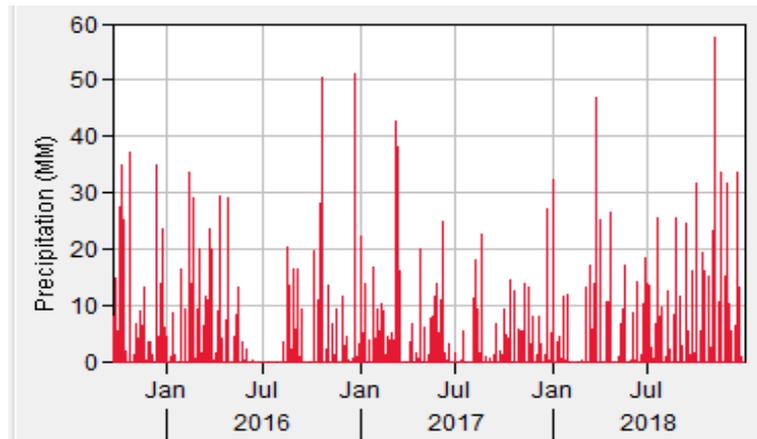
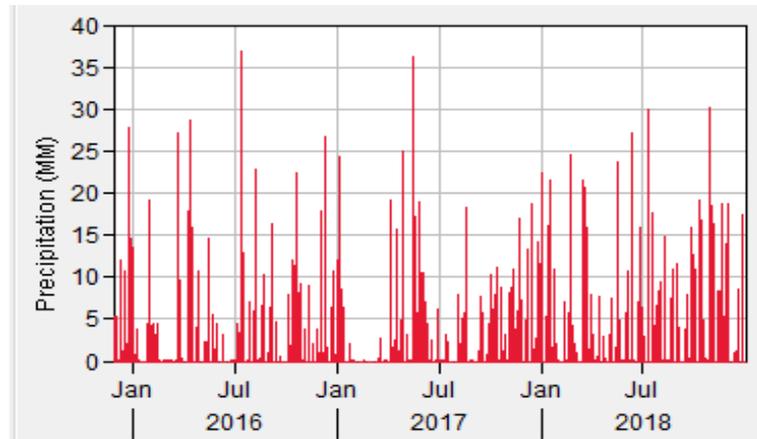
ESTAÇÃO DE COTIPORÃ, DOIS LAJEADOS E ESTRELA



ESTAÇÃO DE IBIRAIARAS, JAQUIRANA E MUÇUM

ESTAÇÃO DE NOVA ROMA DO SUL, SÃO FRANCISCO DE PAULA E SERAFINA
CORRÊA



ESTAÇÃO DE VACARIA E VERANÓPOLIS

APÊNDICE B – APLICAÇÃO DOS MODELOS DE TRANSFORMAÇÃO CHUVA-VAZÃO E DE PROPAGAÇÃO DE ESCOAMENTO

MÉTODO DO SCS PARA TRANSFORMAÇÃO CHUVA-VAZÃO

CARACTERÍSTICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA

MODELO CONCENTRADO					
Local de estudo	Área (km ²)	Talvegue			T _c (h)
		Comprimento (m)	Diferença de cotas (m)	Declividade (m/m)	
Bacia P3	22823,31	442785,32	1151,99	0,0026	53,06

MODELO SEMI-DISTRIBUÍDO					
Local de estudo	Área (km ²)	Talvegue			T _c (h)
		Comprimento (m)	Diferença de cotas (m)	Declividade (m/m)	
Bacia P1	16173,80	383941,32	1124,19	0,0029	46,64
Bacia P2	3114,69	396165,16	645,54	0,0032	29,79
Bacia P3	3534,82	442785,32	652,25	0,0043	22,72

PARÂMETROS INICIAIS DE ENTRADA CALCULADOS PARA O HEC-HMS

MODELO CONCENTRADO						
Local de estudo	CN II	CN III	S (mm)	I _a (mm)	T _c (min)	Lag time (min)
Bacia P3	83,38	92,03	22,01	4,40	3505,36	2103,22

MODELO SEMI-DISTRIBUÍDO						
Local de estudo	CN II	CN III	S (mm)	I _a (mm)	T _c (min)	Lag time (min)
Bacia P1	82,25	91,42	23,83	4,77	3162,28	1897,37
Bacia P2	86,08	93,43	17,86	3,57	2352,36	1411,42
Bacia P3	87,02	93,91	16,47	3,29	1879,78	1127,87

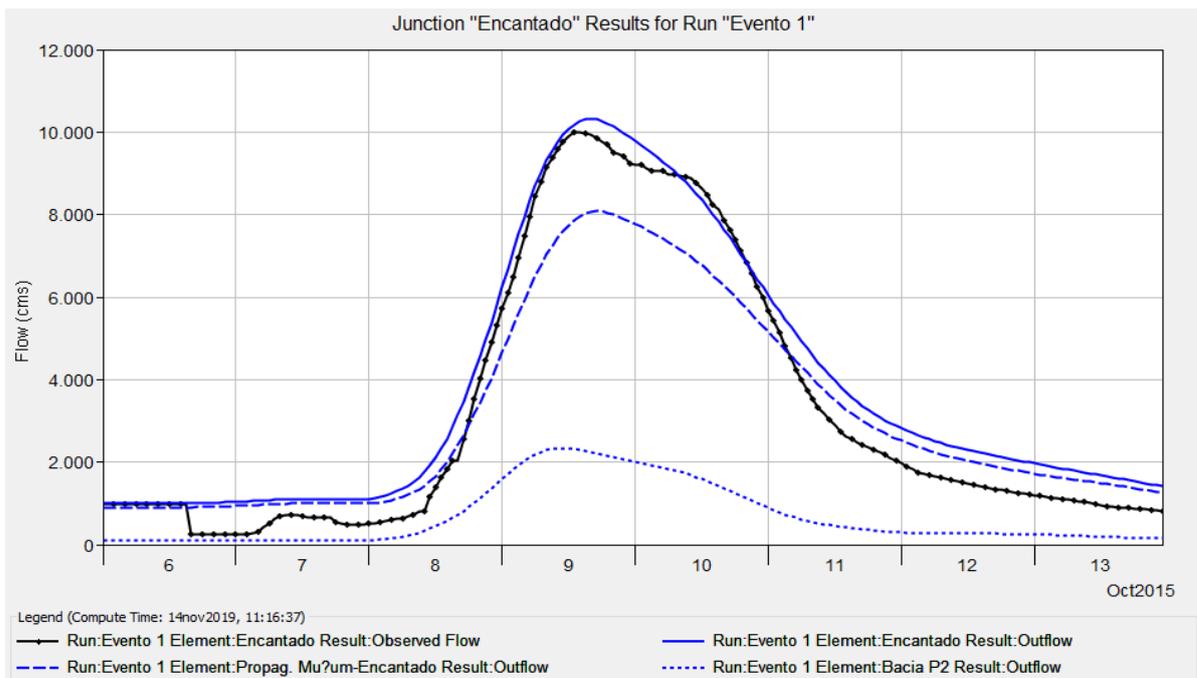
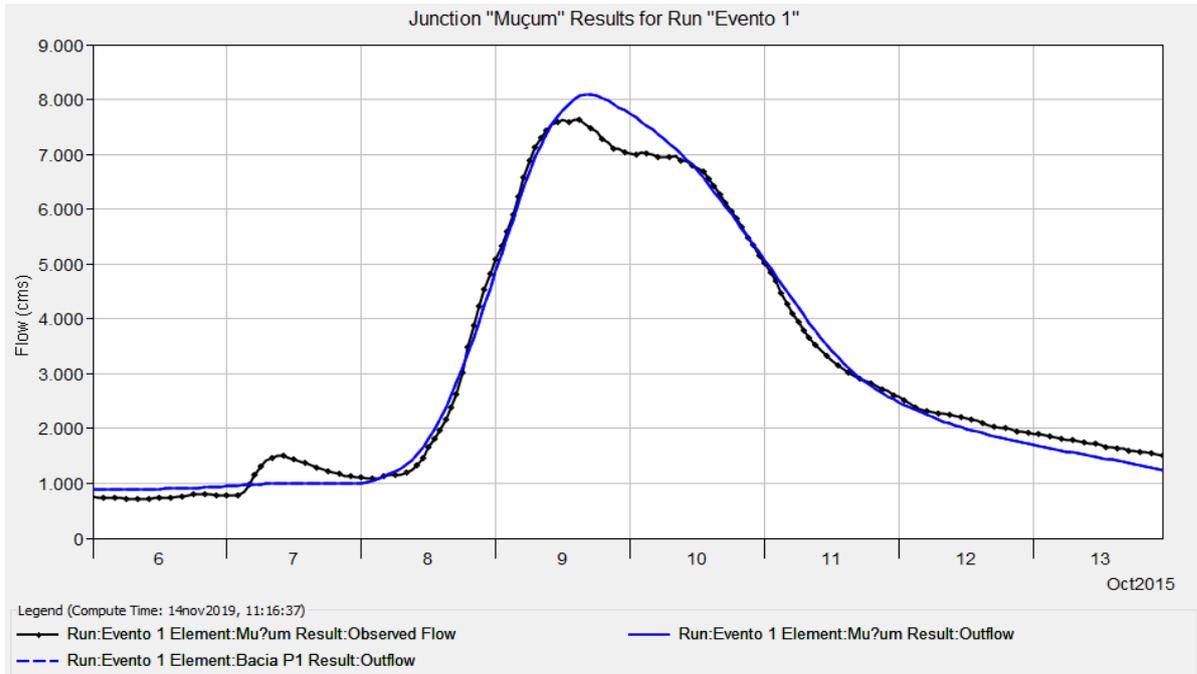
MODELO DE MUSKINGUM-CUNGE PARA PROPAGAÇÃO DE ESCOAMENTO

PARÂMETROS INICIAIS DE ENTRADA CALCULADOS PARA O HEC-HMS

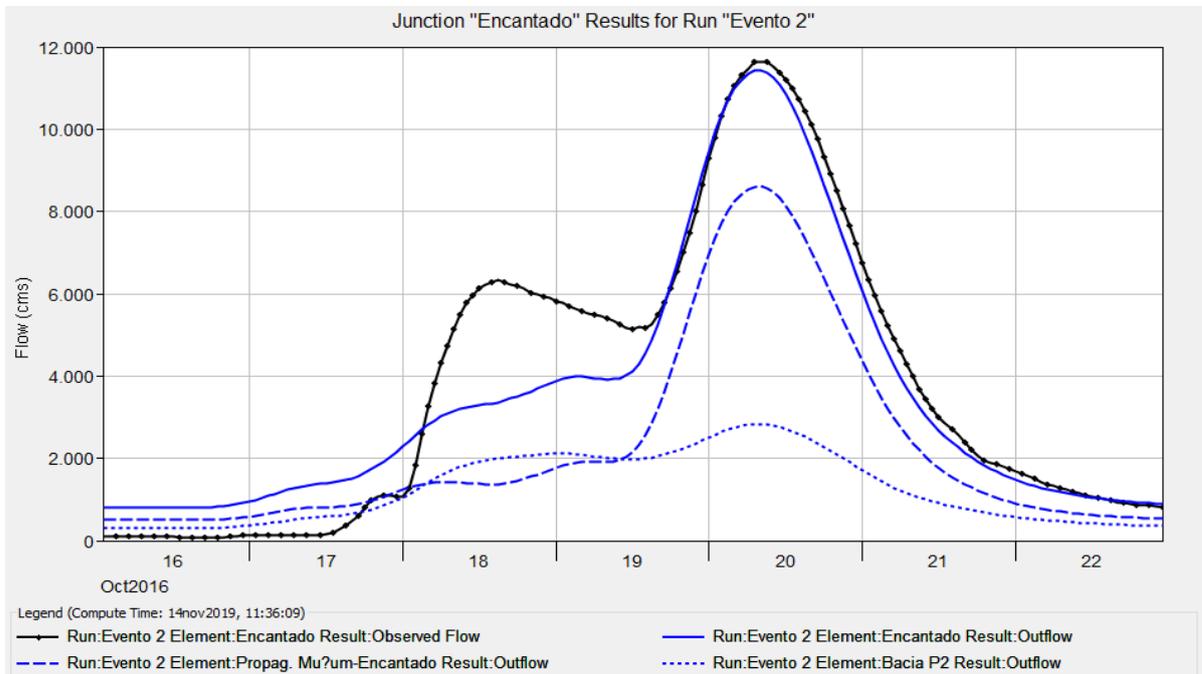
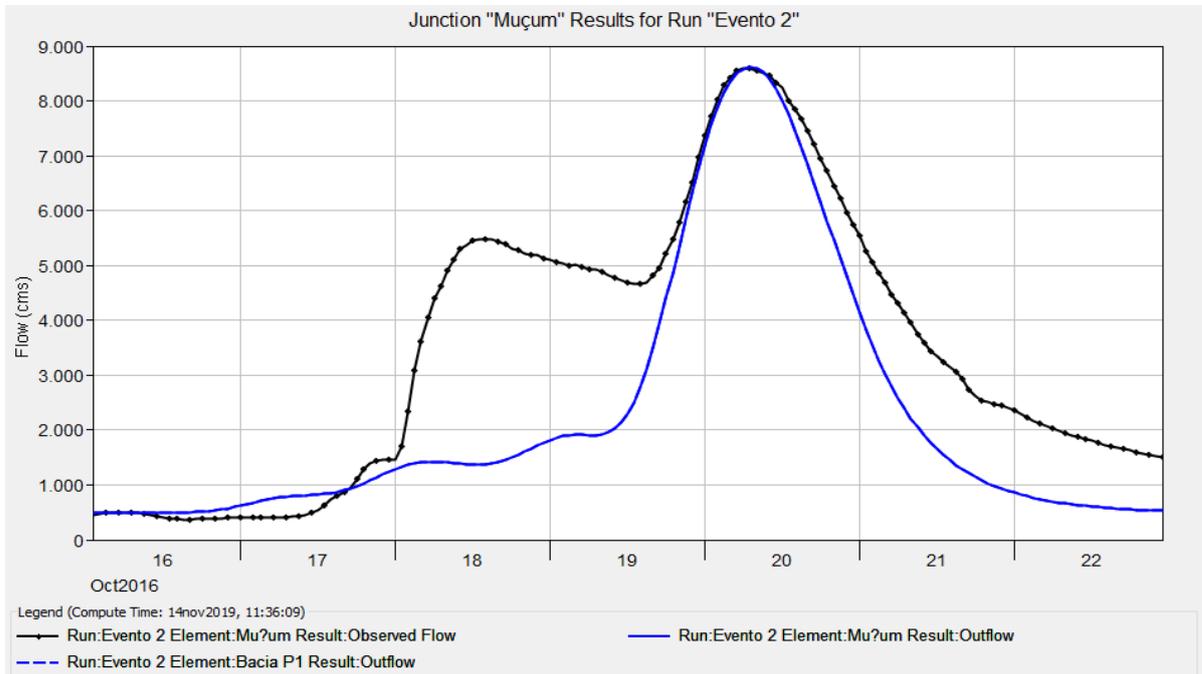
	Comprimento (m)	Declividade (m/m)	Manning (n)
Trecho de P1 a P2	12223,84	0,0011	0,035
Trecho de P2 a P3	46620,16	0,0002	0,035

APÊNDICE C – HIDROGRAMAS SIMULADOS NAS ESTAÇÕES DE MUÇUM E ENCANTADO PARA MODELO SEMI-DISTRIBUÍDO

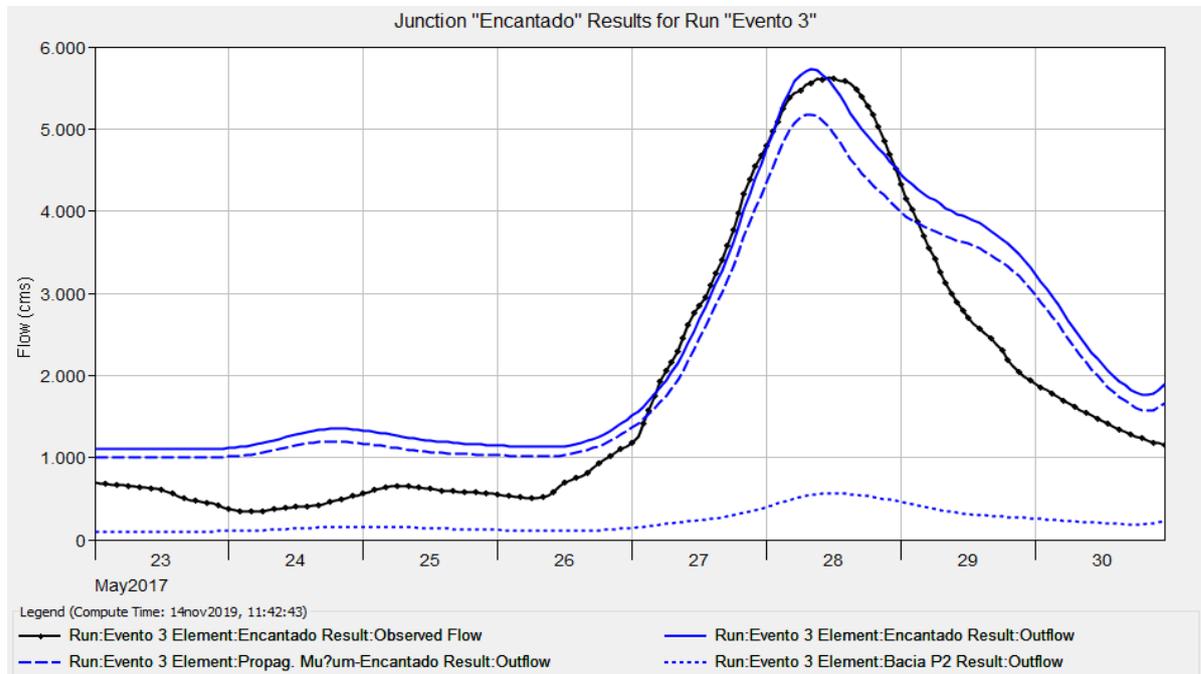
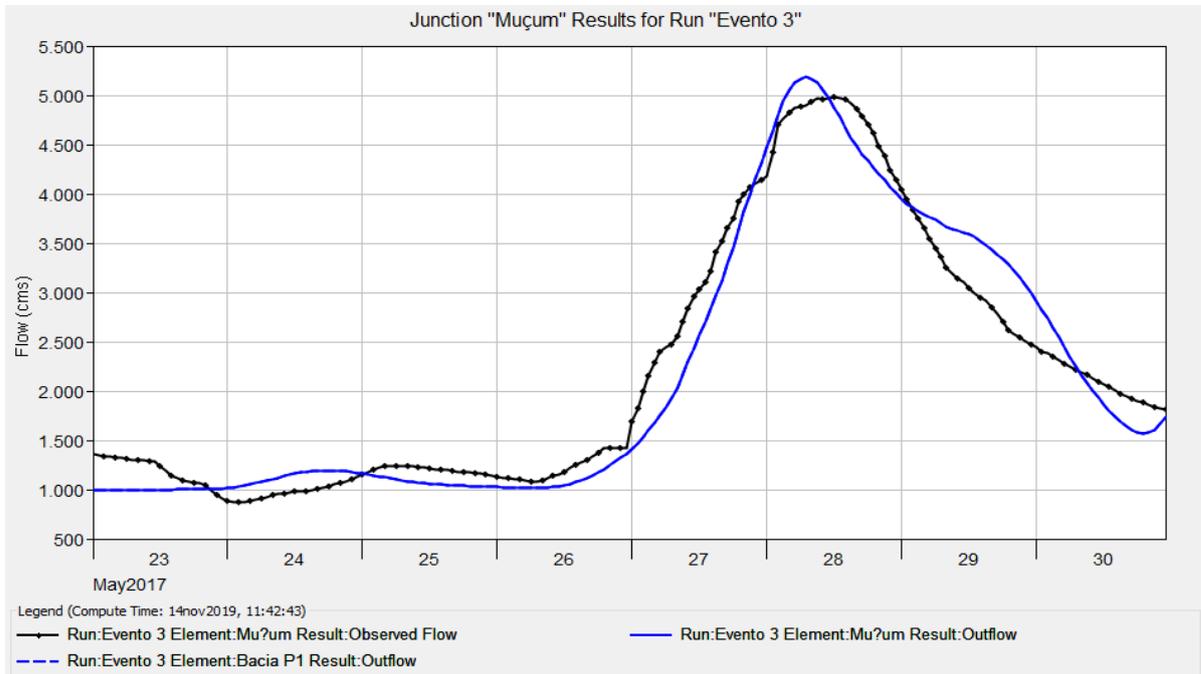
EVENTO 1



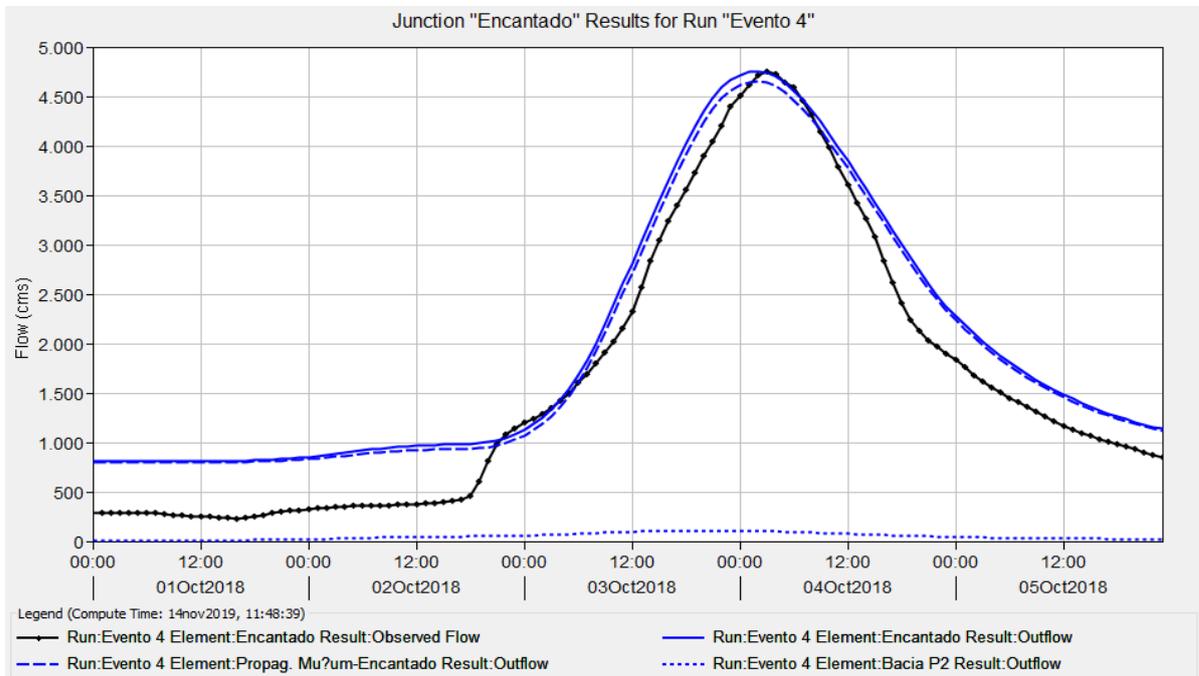
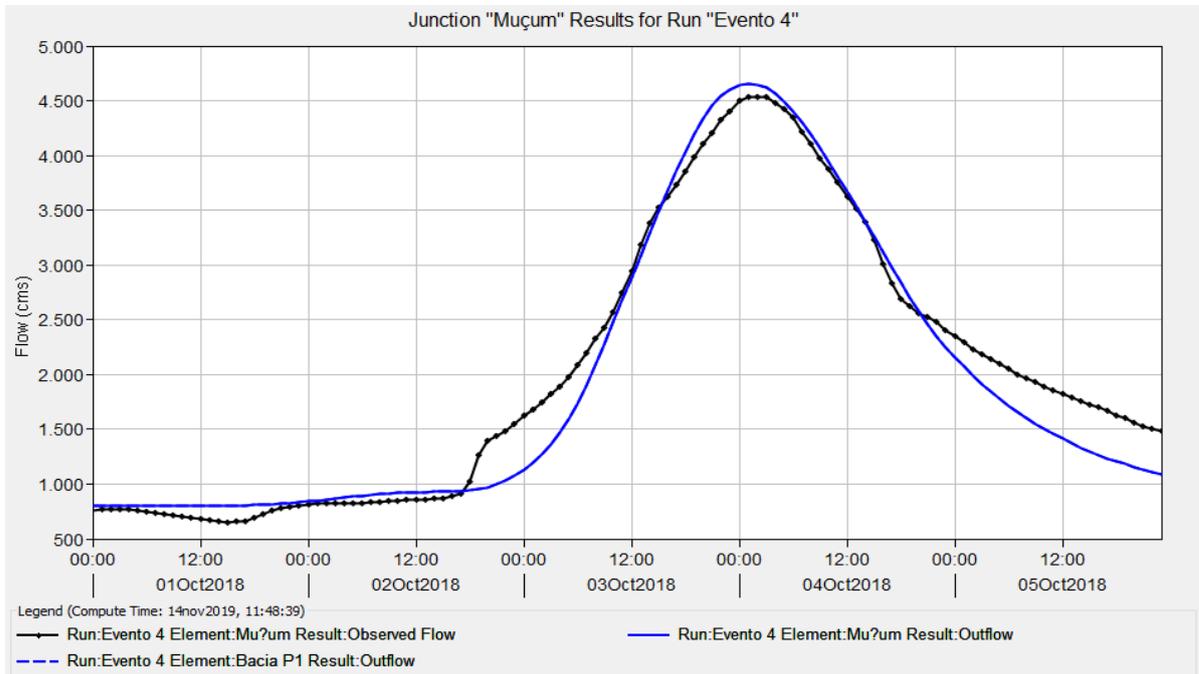
EVENTO 2



EVENTO 3

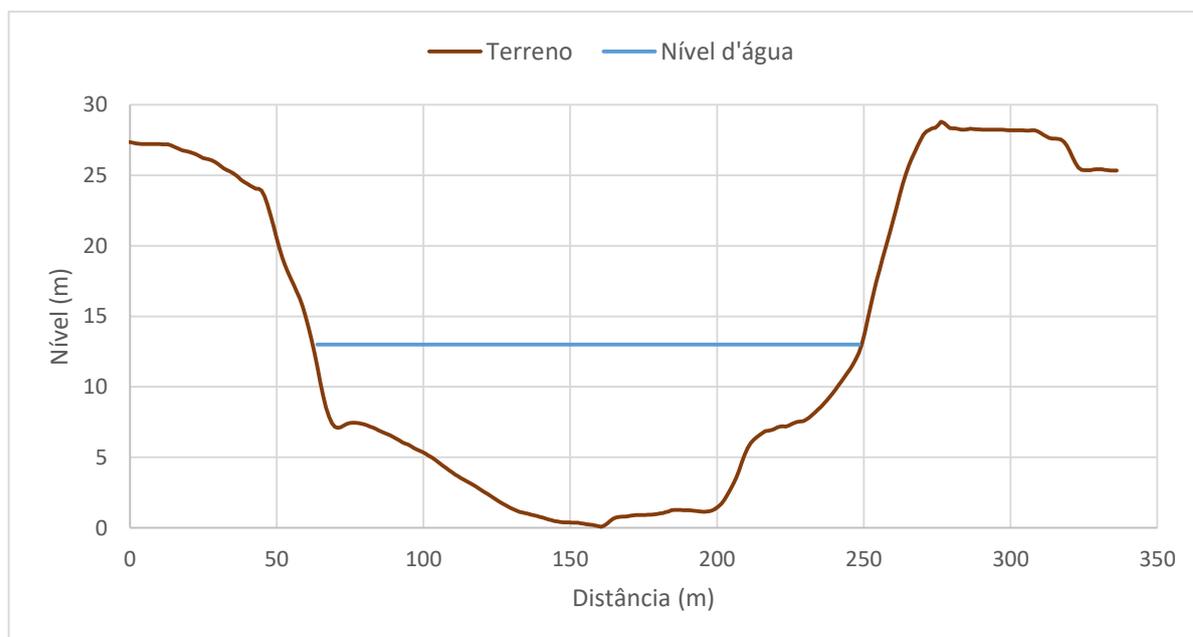


EVENTO 4



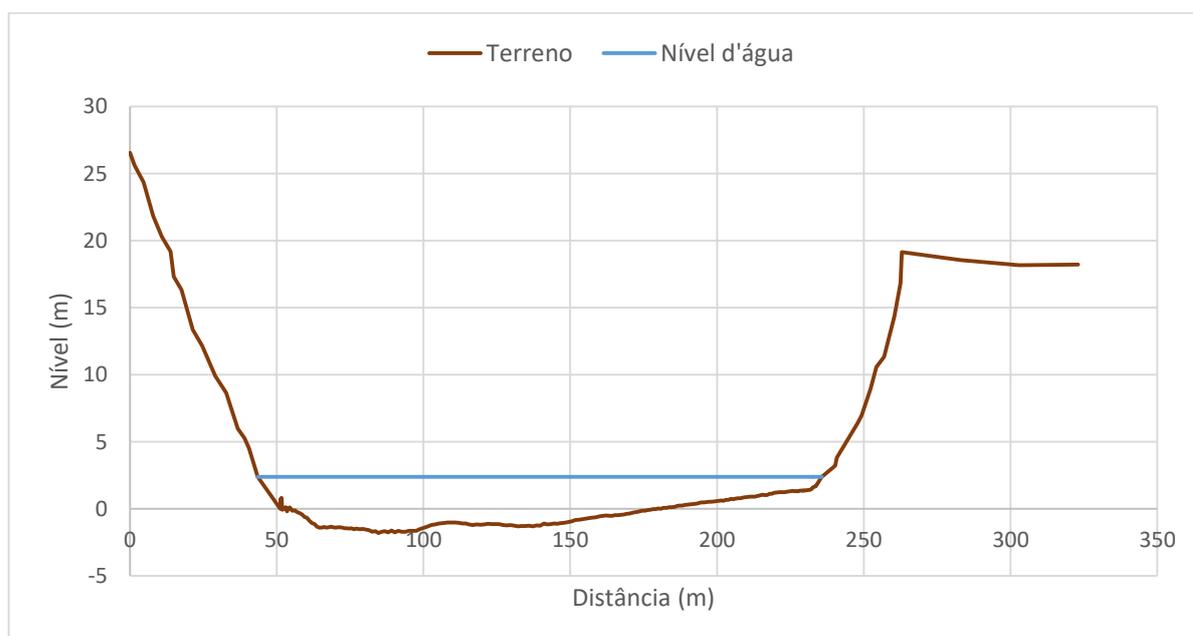
ANEXO A – SEÇÕES TRANSVERSAIS DO RIO TAQUARI PARA OS MUNICÍPIOS DE ESTRELA E ENCANTADO

Seção Transversal do Rio Taquari em Estrela



Fonte: Agrosig Engenharia e Meio Ambiente (2016).

Seção Transversal do Rio Taquari em Encantado



Fonte: Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais – CPRM (2019).