

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Engenharias
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária



Trabalho de Conclusão de Curso

Proposta metodológica para simulação de inundações na Bacia do Santa Bárbara

Arthur Sperotto Peruzzo

Pelotas, 2017

Arthur Sperotto Peruzzo

**Proposta metodológica para simulação de inundações na Bacia do Santa
Bárbara**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Centro de Engenharias, da Universidade
Federal de Pelotas, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Diuliana Leandro

Co-orientadora: Prof^a. M^a. Tamara Leitzke Caldeira

Pelotas, 2017

Arthur Sperotto Peruzzo

Proposta metodológica para simulação de inundações na Bacia do Santa Bárbara

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado, como requisito parcial, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 20 de dezembro de 2017.

Banca examinadora:

.....
Prof^a. Dr^a. Diuliana Leandro (Orientadora).
Doutora em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná.

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

.....
Prof^a. Dr^a. Andréa Souza Castro.
Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande

Agradecimentos

Aos meus pais, Giovani e Rosária pelo apoio incondicional ao longo de toda minha vida.

Ao meu irmão, Felipe, pelo companheirismo e grande amizade.

À minha namorada, Antonielli, pelo carinho, cuidado e parceria.

A todos os professores que de alguma forma contribuíram para minha formação acadêmica, em especial os professores Érico, Luciara, Diuliana e Tamara.

A todos os amigos e colegas que possibilitaram bons e alegres momentos de convivência.

Muito obrigado!

Resumo

PERUZZO, Arthur Sperotto. **Proposta metodológica para simulação de inundações na Bacia do Santa Bárbara**. 2017. 88f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.

Os fenômenos de inundação relacionados a eventos extremos de precipitação impactam de forma severa populações em diversas cidades do planeta. Desenvolvida às margens de arroios, em ambiente propício ao acontecimento de inundações, a cidade de Pelotas é frequentemente cenário desses desastres. A bacia do Arroio Santa Bárbara, bacia urbanizada do município, é uma das áreas mais atingidas por tais fenômenos devido a suas características topográficas e de ocupação inadequada. Com a finalidade de facilitar a compreensão acerca dos eventos de inundação, é essencial a identificação do comportamento e risco a eles associados, permitindo criar uma informação que facilite aos órgãos responsáveis pela Defesa Civil na tomada de decisão frente a tais problemas. Dentro desse escopo, tendo como objeto de estudo a bacia do Santa Bárbara, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma metodologia para modelagem hidrológica que permita a realização do mapeamento e análise do comportamento da inundação na bacia urbanizada frente a cenários de precipitação intensa. Com o auxílio dos *softwares* de modelagem desenvolvidos pelo *Hydrologic Engineering Center (US Army Corps of Engineers)*, o HEC-HMS e o HEC-RAS, em conjunto com o programa de Sistema de Informação Geográfica (SIG), o ArcMap. A partir de um dado de entrada do tipo *raster*, representativo de um Modelo Digital de Elevação (MDE), de um dado vetorial da hidrografia da bacia e da equação Intesidade-Duração-Frequência de Pelotas, foram delineadas as sub-bacias a serem trabalhadas e foram processados os parâmetros necessários para os cálculos de modelagem hidrológica referentes à perda e transformação da precipitação. Com uso dos métodos SCS *Curve Number* e SCS *Unit Hydrograph*, foram determinados os Hietogramas de Precipitação Excedente, Hidrogramas Unitários Adimensionais (HUA) e Hidrogramas de Projeto para cada uma das sub-bacias. Com posse dos valores de vazão oriundos da barragem e do escoamento superficial das sub-bacias (calculados para um tempo de retorno de cem anos), os dados foram associados a uma geometria bidimensional, representativa do terreno, criada no HEC-RAS, ambiente onde foram processadas as simulações de inundações. Os dados gerados nas simulações foram exportados no formato *raster* para o ambiente SIG onde foram feitas análises do comportamento do evento simulado frente a eventos registrados do passado e gerados os mapas de inundação. A comparação permitiu a validação da metodologia aplicada do ponto de vista qualitativo, tendo em vista a existência da lâmina da água simulada, para quase todos os pontos de registro de inundação dos eventos conhecidos.

Palavras-chave: modelagem hidrológica; SIG; inundações urbanas; simulação de inundação; HEC-RAS.

Abstract

PERUZZO, Arthur Sperotto. **A methodological proposal for flood simulation in Santa Barb ra Basin**. 2017. 88p. End-of-graduation-course Paper (TCC). Graduation in Environmental and Sanitary Engineering. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.

Flood phenomena related to extreme precipitation events severely impact populations in many cities around the world. Developed on the banks of streams, in an environment conducive to the occurrence of floods, the city of Pelotas is often the scene of these disasters. The Arroio Santa Bárbara basin, an urbanized basin in the municipality of Pelotas, due to its topographic characteristics and inadequate occupation is one of the most worrying areas within such scenarios. In order to facilitate understanding of flood events, it is essential to identify the associated behavior and risk in a way that creates information that facilitates decision-making to deal with such problems. Within the scope of this study, the present study proposes the development of a methodology for hydrological modeling that allows the mapping and analysis of the behavior of urbanized basins against intense precipitation scenarios. With the help of the modeling software developed by the Hydrologic Engineering Center (HEC-HMS and HEC-RAS), together with the Geographic Information System (GIS) program, ArcMap, the present work was carried out. From a raster input data, representative of a Digital Elevation Model (DEM), a data vector of the basin hydrography and the IDF equation for Pelotas the sub-basins were delineated, and the parameters required for calculations of hydrological modeling for forgiveness and precipitation transformation were processed. Using the SCS Curve Number and SCS Unit Hydrograph, rainfall excess and de the surface runoff were determined for each of the sub-basins. With the possession of dam flow values and the surface runoff of the sub-basins (calculated for a 100-year return time), these were associated with a two-dimensional geometry created in the HEC-RAS, where flood simulations were performed. The data generated in the simulations were finally exported in the raster format to the GIS environment where the analysis of the behavior of the simulated events was compared in relation to past known events. The comparison allowed the validation of the methodology applied from the qualitative point of view, considering the existence of the simulated water sheet, for almost all the flood recording points of the known events.

Keywords: hydrological modeling; GIS; urban flood; flood simulation; HEC-RAS.

Lista de Figuras

Figura 1 - Característica dos leitos do rio.....	18
Figura 2 - Hidrograma de bacia rural que foi urbanizada	19
Figura 3 - Etapas do processo de construção de um modelo TIN.....	27
Figura 4 - Área de estudo.....	33
Figura 6 – Fluxograma dos processos utilizados no pré-processamento do MDE	37
Figura 7 – Sub-bacias delineadas	38
Figura 8 - Definição do parâmetro de perda.....	39
Figura 9 – Definição do parâmetro de transformação	40
Figura 10 – Vertedouro do canal Santa Bárbara	48
Figura 11 – Geometria 2D e <i>boundary conditions</i> desenhados no <i>software</i> HEC-RAS	51
Figura 12 – Definições de parâmetros associados à geometria 2D	52
Figura 13 – Definição de <i>boundary conditions</i>	53
Figura 14 – <i>Boundary condition</i> preenchida com Hidrograma do vertedor da barragem.....	54
Figura 15 – Gráfico do Hidrograma do vertedor da barragem.....	54
Figura 16 – Definição dos parâmetros de controle para processamento dos dados (<i>Unsteady Flow Analysis</i>).....	55
Figura 17 – Modelo de Digital de Elevação (MDE).....	57
Figura 18 – Raster da bacia contendo as variações altimétricas	58
Figura 19 – <i>Raster da área urbana da bacia contendo as variações altimétricas.</i>	59
Figura 21 – Acumulo de fluxo na área de estudo	61
Figura 22 – Mapa de declividade	62
Figura 23 - Escoamento superficial no formato.hms	63
Figura 24 – Mapa de solo (pedologia).....	64
Figura 25 - Hietograma de projeto para o tempo de retorno de 100 anos.....	66
Figura 26 – Hietograma de chuva efetiva da sub-bacia W1750	67
Figura 27 – Vazão de chegada na Barragem.....	67
Figura 28 - Comportamento do amortecimento da vazão de pico.....	68
Figura 29 – Vazões das sub-bacias	69
Figura 30 - Plano com todas vazões	71
Figura 31 - Plano somente com o escoamento superficial das sub-bacias urbanas.	72
Figura 32 - Plano somente com a vazão do vertedor.....	72
Figura 33 – Simulação de inundação X eventos registrados	73
Figura 34 - Alturas da lâmina de água oriundos de simulação a partir de valores de projeto – Detalhe 1.....	74
Figura 35 - Alturas da lâmina de água oriundos de simulação a partir de valores de projeto – Detalhe 2.	75

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Registros de inundações no Brasil no período de 1940 até 2008	14
Tabela 2 – Definições de diferentes autores sobre o conceito de inundação (<i>flood</i>)	15
Tabela 3 – Definições de diferentes autores sobre o conceito de inundação brusca	16
Tabela 4 – Características do tempo de retorno para projetos de drenagem	21
Tabela 5 – Medidas não estruturais	25
Tabela 6 – <i>Softwares</i> de modelagem hidrológica.....	29
Tabela 7 – Fontes de Dados	34
Tabela 8 – Classificação do solo conforme suas propriedades de infiltração de acordo com o SCS	41
Tabela 9 – Valores de impermeabilização para diferentes coberturas de solo	42
Tabela 10 – Valores de impermeabilização para diferentes coberturas de solo	42
Tabela 11 – Classificação dos solo presentes na bacia conforme suas propriedades de infiltração de acordo com o SCS	64
Tabela 12 – Parâmetros hidrológicos calculados	65
Tabela 13 – Parâmetros hidrológicos calculados	66
Tabela 14 – Coeficiente de rugosidade de Manning	70

Lista de abreviaturas e siglas

HEC – *Hydrologic Engineering Center*
SIG – Sistemas de informações geográfica
SCS – *Soil Conservation Service*
MDE – Modelo Digital de Elevação
MDEHC - Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
IDF – Intensidade, Duração e Frequência
HUA – Hidrograma Unitário Adimensional
CN – Curva Número
MNT – Modelo Numérico de Terreno
EM-DAT – *Emergency Data Base*
BMP – *Best Management Practices*
LID – *Low Impact Development*
MDT – Modelo Digital de Terreno
TIN – *Triangular Irregular Network*
HEC-RAS - *Hydrologic Engineering Center's: River Analysis System*
HEC-HMS - *Hydrologic Engineering Center's: Hydrologic Modeling System*
HU – Hidrograma Unitário
Pu – Precipitação Unitária
D – Tempo de duração
SCG – Sistema de Coordenada Geográfica
UTM – Universal Transversa de Mercator
MUB – Mapeamento Urbano Básico
IS – Impermeabilidade dos Solos

Sumário

1 Introdução	11
1.1 Objetivos	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
2 Revisão Bibliográfica	14
2.1 Inundações e sua relação com a urbanização	14
2.2 Drenagem urbana	19
2.3 Mitigação e controle de inundações	22
2.3.1 Medidas estruturais	23
2.3.2 Medidas não estruturais	24
2.4 Mapeamento de inundações	26
2.5 Modelagem Hidrológica	26
2.5.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)	26
2.5.2 Modelos de Inundações	28
3 Metodologia	32
3.1 Caracterização da Área de Estudo	32
3.2 Dados utilizados	33
3.3 Delineamento experimental	34
3.3.1 Preparação do modelo da bacia	36
3.3.2 Separação das sub-bacias, obtenção de parâmetros HEC-GeoHMS e importação do projeto HEC-HMS	37
3.3.3 Determinação dos valores Curva Número (CN)	40
3.3.4 Determinação dos valores de impermeabilidade do solo	41
3.3.5 Processos de Modelagem Hidrológica	43
3.3.5.1 Sub-bacia W1750	46
3.3.5.2 Barragem Santa Bárbara	47
3.3.5.3 Sub-bacias urbanas	49
3.3.6 Simulação de Inundações	49
4 Resultados e Discussão	56
4.1 Modelo digital de elevação	56
4.1.1 Triangular Irregular Network (TIN)	56
4.1.2 TIN to Raster	57
4.2 HECGeo-HMS	59
4.3 Mapa de Declividade	61
4.4 Preparo dos dados para importação para ambiente HEC-HMS	62
4.3 CN e Impermeabilidade dos solos (IS)	63
4.4 Modelagem hidrológica	65
4.4.2 Bacias Urbanas – HEC-HMS	68
4.5 Simulação de inundações - HEC-RAS	69
4.6 Comparações com eventos de inundação	72
5 Considerações finais	76
5.1 Limitações	78
5.2 Perspectivas futuras	78
Referências	79
Apêndices	83

1 Introdução

O avanço econômico e a busca de oportunidades de trabalho nas cidades fizeram com que a população brasileira se concentrasse em zonas urbanas, de acordo com Mota (2011), em 1940, a concentração urbana no Brasil era de 31% da população total e, em 2010, já passava de 85%. Este crescimento populacional e a expansão das cidades, de forma geral, não foram acompanhados de uma infraestrutura urbana sustentável, resultando em problemas socioambientais como ocupações de áreas de risco, condições precárias de saneamento, perda de vegetação em Área de Preservação Permanente (APP), impermeabilização do solo e assoreamento dos rios (COSTA, 2013).

Um dos problemas mais notáveis relacionados à urbanização são as inundações, um tipo de desastre bem conhecido pelos brasileiros. Considerando dados do EM-DAT (2014), o Brasil está entre os países mais afetados por inundações no mundo, com um alto número de pessoas afetadas e de mortes (EM-DAT, 2014; TOMINAGA et al., 2009).

As inundações nas zonas urbanas ocorrem desde as primeiras civilizações que se estabeleceram à margem de recursos hídricos. Ela ocorre no momento em que a vazão presente em um rio, canal ou sistema de drenagem excede a sua capacidade de transporte do sistema, transformando esse excedente de água em escoamento superficial que atinge a zona urbanizada, afetando em diferentes magnitudes a vida das pessoas que habitam o local. A inundação ocorre de forma natural quando um rio é exposto a uma precipitação intensa, mas também é acelerada por efeitos antrópicos como a impermeabilização das superfícies e a canalização dos rios (TUCCI, 2003).

As mudanças no meio ambiente, provocadas pelo homem, causam um impacto na dinâmica das inundações. Conforme Anees et al. (2016), as mudanças climáticas, bem como a urbanização e modificação topográfica são fatores que levam a um aumento da probabilidade de ocorrência de eventos climáticos extremos. Devido a essa aceleração causada pela intervenção do homem nos processos naturais, as inundações originadas por precipitações excessivas são um fenômeno climático que ocorre de modo frequente. Nos meios mais urbanos, os impactos ocasionados por estes fenômenos são mais notáveis que nos meios

menos urbanizados, afetando diretamente a dinâmica das cidades (ALMEIDA, 2015).

Associado a estar localizada em uma área de alta probabilidade de ocorrência de eventos climáticos extremos (RASERA, 2014) e de condições topográficas específicas, a cidade de Pelotas é um local altamente impactado por inundações também devido à forma como foi desenvolvido o seu processo de urbanização (SILVA, 2007; HANSMANN, 2013). Dentre as sete bacias hidrográficas presentes no município, a Bacia do Canal Santa Bárbara é uma das bacias mais problemáticas quando relacionada a inundações. Localizada ao sul da bacia do Arroio Pelotas, com uma área de 83 km², é uma das menores bacias do município, porém, de essencial importância para a cidade pelo fato de estar conectada à barragem que represa suas águas para o tratamento e abastecimento de água potável para a população. A bacia hidrográfica do Santa Bárbara tem seu ponto mais alto no Distrito de Monte Bonito, descendo pela zona urbana de Pelotas até o ponto onde se conecta ao Canal São Gonçalo (SILVA, 2007).

De acordo com Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres – CENAD (2016), embora não seja possível evitar a ocorrência de fenômenos naturais, pode-se, por meio de medidas preventivas, minimizar seus efeitos para que não se tornem grandes catástrofes. Evitar um desastre natural é mais econômico do que reconstruir as zonas afetadas (LIMA, 2016).

Devido ao grande impacto que é criado à sociedade com o acontecimento destes eventos, muito esforço é emitido por pesquisadores da área e órgãos responsáveis para criar métodos que ajudem na compreensão e solução de problemas relacionados aos eventos de inundação. Recentemente, um dos métodos mais utilizados é o dos modelos de simulação (TENG, 2017).

O desenvolvimento e aprimoramento de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e algoritmos de processamento automático, em combinação com o aumento da capacidade computacional e da disponibilidade de dados obtidos via sensoriamento remoto, têm permitido preparar diversos planos de informação para estudos hidrológicos de grandes áreas a baixo custo e com incrível rapidez (BURQUE, 2009). De acordo com Almeida (2015), os SIG são hoje uma tecnologia que se torna indispensável para a modelagem de inundações, uma vez que permitem integrar o meio físico de uma bacia hidrográfica a um modelo hidrológico, permitindo a aplicação de modelagem matemática para construir cenários da

resposta dessa bacia frente a precipitações com diferentes tempos de retorno (ALMEIDA, 2015).

Com o uso do SIG, dados topográficos podem ser manipulados sob a forma de um Modelo Numérico do Terreno (MNT) ou Modelo Digital de Elevação (MDE), modelos cuja representação é feita mais comumente através de uma matriz ou uma imagem no formato *raster*, em que cada elemento ou pixel tem como atributo o valor de elevação do terreno em relação a um determinado referencial. A análise topográfica feita a partir desses modelos pode ser conduzida de forma que permita a visualização do comportamento de uma bacia hidrográfica frente à determinada precipitação, criando um modelo no qual se possa visualizar o efeito de inundações em uma bacia hidrográfica (BUARQUE et al., 2009).

Dentro deste contexto, a proposta do presente trabalho consiste na criação de uma metodologia de simulação de inundações que permita melhor compreensão do comportamento da água dentro da Bacia do Santa Bárbara, gerando dados que sirvam de suporte para Defesa Civil do município, tanto para análise quanto à tomada de decisão no que se refere aos problemas causados por estes eventos extremos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia de modelagem que permita a simulação e análise crítica de inundações na Bacia do Santa Bárbara frente a diferentes níveis de precipitação.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Discriminar a metodologia para simular uma inundação;
- Simular o comportamento da água na bacia;
- Avaliar as zonas de maior risco dentro da bacia;
- Criar mapas e animações que demonstrem o processo de inundação para pontos específicos da bacia que possam ser utilizados no planejamento e gestão da bacia pelos órgãos públicos, principalmente pela Defesa Civil do município de Pelotas.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Inundações e sua relação com a urbanização

As inundações são um tipo de desastre que afeta muito frequentemente o Brasil. Segundo o EM-DAT (2014), o país está entre os mais afetados por inundações no mundo, sofrendo um grande impacto causado por esses desastres, inclusive com registro de mortes de alguns indivíduos entre a população afetada (EM-DAT, 2014; TOMINAGA et al., 2009) (Tabela 1).

Tabela 1– Registros de inundações no Brasil no período de 1940 até 2008

Período	Nº de Eventos	Nº de Mortes	Nº de Afetados (Desabrigados/Desalojados)
2000-2008	27	776	2.466.592
1990-1999	20	386	317.793
1980-1989	23	1598	8.789.613
1970-1979	11	1142	2.902.371
1960-1969	13	1818	825.986
1950-1959	2	212	-
1940-1949	1	200	-

Fonte: TOMINAGA et al., 2009.

Os desastres envolvem, de forma interligada, vários cenários de risco, por isso se faz necessária uma abordagem integrada da gestão de riscos, contemplando atividades nas etapas de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação, de forma a minimizar os riscos e promover segurança para os sistemas alocados em zonas de maior vulnerabilidade, reduzindo impactos e perdas humanas e materiais (COSTA, 2013).

De acordo com a UN-ISDR (2002), as inundações e enchentes são caracterizadas como problemas geoambientais que derivam de fenômenos ou perigos naturais de caráter hidrometeorológico ou hidrológico, podendo ser de natureza atmosférica, hidrológica ou oceanográfica, sendo altamente relacionadas com a quantidade e intensidade da precipitação atmosférica.

As inundações podem ser divididas em dois grupos: as inundações graduais, que se caracterizam, primeiramente, por uma gradual elevação do nível das águas

e, em seguida, pelo transbordamento lento do leito do recurso hídrico. Em inglês, a inundação gradual é denominada pelo termo *flood*; já as inundações bruscas, do segundo grupo, são aquelas que ocorrem repentinamente, com um período de tempo muito pequeno entre o início do evento climático e o momento da inundação. No Brasil, é popularmente conhecida como enxurrada, e, na língua inglesa, esse tipo de inundação se chama *flash flood* (GOERL; KOBİYAMA, 2005).

A partir dos estudos de Goerl e Kobiyama (2005), nas Tabelas 2 e 3, são expostos alguns conceitos de diferentes autores para definir as inundações graduais e as inundações bruscas.

Tabela 2 – Definições de diferentes autores sobre o conceito de inundação (*flood*)

Termo	Autor	Definição
<i>Flood</i>	NFIP (2005)	Uma condição geral ou temporária, de parcial ou completa inundação, de dois ou mais acres de uma terra normalmente seca, ou duas ou mais propriedades provenientes da inundação de águas continentais ou oceânicas.
<i>Flood</i>	NWS/NOAA (2005)	A inundação de uma área normalmente seca causada pelo aumento do nível das águas em um curso da água estabelecido, como um rio, um córrego, ou um canal de drenagem ou um dique, perto ou no local onde as chuvas precipitaram.
Inundações graduais ou enchentes	CASTRO (1999)	As águas elevam-se de forma paulatina e previsível, mantém em situação de cheia durante algum tempo e, a seguir, escoam-se gradualmente. Normalmente, as inundações graduais são cíclicas e nitidamente sazonais.
Inundações ribeirinhas	TUCCI E BERTONI (2003)	Quando a precipitação é intensa e o solo não tem capacidade de filtrar, grande parte do volume escoar para o sistema de drenagem, superando sua capacidade natural de escoamento. O excesso de volume, que não

		consegue ser drenado, ocupa a várzea, inundando, de acordo com a topografia, as áreas próximas aos rios
<i>River Flood</i>	MEDIONDO (2005)	O transbordamento do curso do rio é normalmente o resultado de prolongada e copiosa precipitação sobre uma grande área. Inundações de rio acontecem associadas a sistemas de grandes rios em trópicos úmidos.

Fonte: Adaptado de Goerl e Kobyama (2005).

Tabela 3 – Definições de diferentes autores sobre o conceito de inundação brusca (*flash flood*)

Termo	Autor	Definição
<i>Flash Flood</i>	NWS/NOAA (2005)	Uma inundação pela pesada ou excessiva chuva em um curto período de tempo, geralmente menos de seis horas. Também, às vezes, uma quebra de barragem pode causar inundação brusca, dependendo do tipo de barragem e o período de tempo em que ocorre a quebra.
<i>Flash Flood</i>	CHOUDHURY et al. (2004)	Inundações bruscas são inundação de curta vida e duram de algumas horas a poucos dias; originam-se de pesadas chuvas.
<i>Flash Flood</i>	KÖMÜŞÇÜ et al. (1998)	Inundações bruscas são normalmente produzidas por intensas tempestades convectivas, a qual buscam rápido escoamento; o dano da inundação, geralmente, ocorre dentro de poucas horas de chuva, o que causa e afeta uma área muito limitada.
Inundação brusca ou enxurrada	CASTRO (1999)	São provocadas por chuvas intensas e concentradas em regiões de relevo acidentado, caracterizando-se por súbitas e violentas elevações das caudais, as quais se escoam

		de forma rápida e intensa.
<i>Flash Flood</i>	MEDIONDO (2005)	É um evento de inundação de curta duração com uma rápida elevação da onda de inundação e rápida elevação do nível das águas. São causadas por pesadas precipitações, geralmente curtas, como uma chuva torrencial, em uma área que frequentemente é pequena.
<i>Flash Flood</i>	WMO (1994)	Em bacias pequenas, de rápida resposta, como as de tempo de concentração menor de seis horas, uma intensa precipitação pode criar uma inundação brusca.

Fonte: Adaptado de Goerl e Kobayama (2005).

Segundo Tucci (2008), as inundações são oriundas do escoamento pluvial e podem causar impactos nas áreas urbanas em razão de dois processos, que podem ocorrer de forma isolada ou combinada:

- *Inundações de áreas ribeirinhas*: ocorrem naturalmente no leito maior dos rios em função da variabilidade temporal e espacial da precipitação e do escoamento na bacia hidrográfica;
- *Inundações em razão da urbanização*: ocorrem na drenagem urbana e são aceleradas pelos fatores da impermeabilização do solo, canalização do escoamento ou obstruções ao escoamento.

Os rios, de maneira geral, possuem dois leitos, o leito menor, que é o espaço por onde a água escoar, na maior parte do tempo, e o leito maior, que possui um nível superior ao leito menor. As inundações ocorrem quando o escoamento atinge o nível do leito maior, conhecido como área ribeirinha, o qual sofre o impacto da inundação pelo fato de, muitas vezes, ser ocupado por uma população (Figura 1).

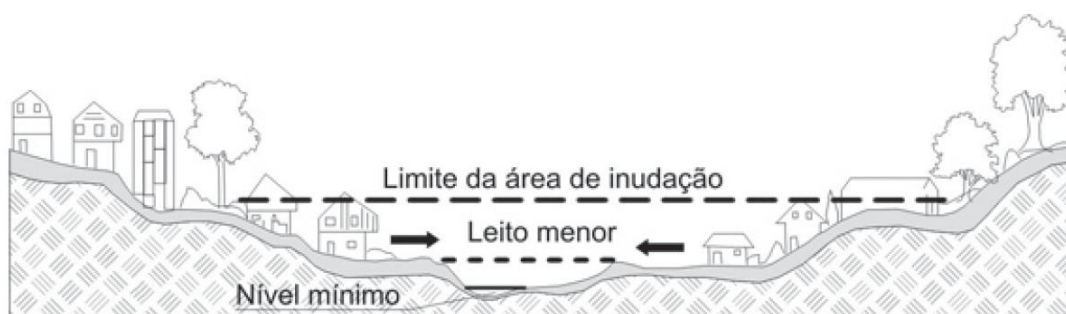


Figura 1 - Característica dos leitos do rio
Fonte: TUCCI, 2008.

Segundo o autor, as razões que proporcionam a condição de inundação no leito maior dos rios podem ser resumidas nas seguintes ações (TUCCI, 2008):

- Pelo fato de o Plano Diretor de Desenvolvimento urbano das cidades não restringir a ocupação das áreas de risco;
- Pela invasão das áreas ribeirinhas por populações de baixa renda;
- Pela ocupação de áreas de médio risco, que, apesar da menor frequência, também sofrem prejuízos significativos frente a eventos mais extremos.

A urbanização representa uma das manifestações mais significativas da atividade humana. O aumento populacional nas cidades é um fator que desencadeia obrigatoriamente uma expansão espacial do território, situação que cria problemas de infraestrutura urbana quando não planejada de forma adequada (TUCCI; BERTONI, 2003).

Ainda segundo Tucci (2008), as enchentes têm um aumento na sua frequência e magnitude em razão da impermeabilização do solo e da construção da rede de condutos pluviais. De uma maneira geral, as enchentes relacionadas à urbanização ocorrem em bacias pequenas (entre 10 km² e 100 km²) e provocam impactos como:

- O aumento das vazões máximas, fator altamente associado com a impermeabilização e canalização de rios (Figura 2);
- O aumento da produção de sedimentos por falta de obras que protejam as superfícies de drenagem e pela geração de resíduos sólidos;

- A perda da qualidade da água em razão da contaminação que é causada pela população residente às águas superficiais;
- Modificações ambientais causadas por obras de engenharia que são feitas sem levar em consideração o desenvolvimento sustentável.

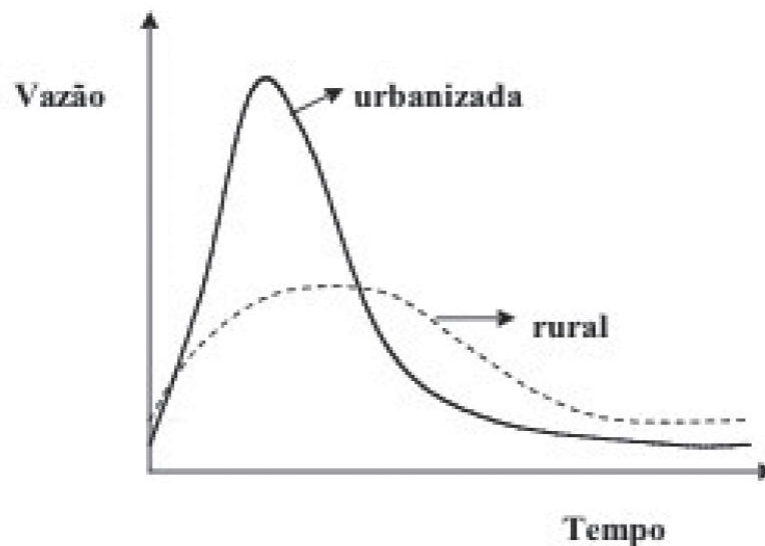


Figura 2 - Hidrograma de bacia rural que foi urbanizada

Fonte: TUCCI, 2008.

Os impactos da urbanização mal planejada resultam em um grande custo financeiro para as instituições públicas. As ações imediatistas e de remediação pós-eventos drásticos são difíceis de serem planejadas e, geralmente, são muito custosas. Por esse motivo se faz necessário o investimento em técnicas sustentáveis de controle e gerenciamento das águas urbanas, prevenindo ou minimizando os impactos destes eventos extremos (COSTA, 2013; SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012).

2.2 Drenagem urbana

De acordo com Tucci et al. (1995), os sistemas de drenagem podem ser caracterizados como drenagem *na fonte*, *microdrenagem* e *macrodrenagem*. A drenagem *na fonte* é definida pelo escoamento que ocorre no lote, condomínio ou empreendimento individualizado.

A *microdrenagem* é definida pelo sistema de condutos pluviais ou canais de um loteamento ou de rede primária urbana. Este tipo de sistema de drenagem é projetado para atender a drenagem de precipitações com risco moderado.

A *macrodrenagem* envolve os sistemas coletores de diferentes sistemas de microdrenagem. Quando é mencionado o sistema de macrodrenagem, as áreas envolvidas são de, pelo menos, dois km² ou 200 ha. Estes valores não devem ser tomados como absolutos porque a malha urbana pode possuir as mais diferentes configurações (TUCCI et al., 1995).

Para o dimensionamento dos sistemas de drenagem urbana utiliza-se o conceito de tempo de retorno (Tr), que é igual ao inverso da probabilidade (p) de um determinado evento hidrológico e representa, em média, o tempo que este evento demora para se repetir (Equação 1) (IPH, 2005).

$$Tr = \frac{1}{p} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: Tr = tempo de retorno (anos); p = probabilidade

Ao determinar que o projeto de uma obra seja feito para um período de retorno, pode-se calcular também o risco ao qual essa população está sujeita. Esse risco é definido pela probabilidade que esta obra tem de falhar, pelo menos uma vez em um determinado período de tempo (Equação 2).

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^n \quad \text{Equação 2}$$

Onde: R = risco de falha (anos); Tr = tempo de retorno (anos); n = quantidade de anos.

Segundo o IPH (2005), a probabilidade ou tempo de retorno é calculado com base em uma série histórica de precipitação observada no local onde o empreendimento será feito. Sendo assim, em projetos de áreas urbanas em que exista uma alteração na bacia, o risco adotado acaba se referindo à ocorrência de uma determinada precipitação, e não necessariamente a uma vazão resultante, que é a consequência da precipitação em combinação com outros fatores da bacia hidrográfica. O risco que é adotado para um determinado projeto define a dimensão

dos investimentos que serão envolvidos e a segurança desta obra quanto às enchentes.

Para projetos de drenagem urbana, os tempos de retorno adotados são geralmente consultados em literatura. A Tabela 4 apresenta alguns destes valores adotados.

Tabela 4 – Características do tempo de retorno para projetos de drenagem

Sistema	Característica	Intervalo Tr (anos)	Valor frequente (anos)
Microdrenagem	Residencial	2 – 5	2
	Comercial	2 – 5	5
	Áreas de prédios públicos	2 – 5	5
	Aeroporto	5 – 10	5
	Áreas comerciais e Avenidas	5 – 10	10
Macrodrenagem		10 – 25	10
Zoneamento de áreas ribeirinhas		5 – 100	100*

*limite da área de regulamentação

Fonte: IPH, 2005.

Depois de definido o tempo de retorno, o parâmetro mais importante a ser considerado é a chuva de projeto, que é definido por Canholi (2005) como o pico do deflúvio associado a uma precipitação crítica e a um determinado risco. A chuva de projeto é entendida como uma ocorrência de precipitação extrema, com duração, distribuição temporal e espacial crítica para uma bacia hidrográfica, sendo retratada pela curva de intensidade, duração e frequência (IDF) (COSTA, 2013).

De forma genérica, as curvas IDF podem ser representadas pela Equação 3:

$$i = \frac{a \cdot Tr^b}{(t+c)^d} \quad \text{Equação 3}$$

Onde: i = intensidade de chuva (mm/h); Tr = tempo de retorno (anos); t = duração da chuva (min); a, b, c, d = coeficientes ajustados para cada localidade.

O tempo correspondente a duração da chuva é igual à duração do evento pluvial de um determinado tempo de retorno, sendo esse valor definido para o tempo que conduz a máxima vazão no rio e deve ser longo o suficiente para que toda a bacia do local do estudo esteja contribuindo. De uma forma geral, utiliza-se o valor do tempo de concentração, que é definido por Tomaz (2013) como o tempo que leva para que toda a bacia considerada contribua para o escoamento superficial, sendo igual ao tempo necessário para que a gota da água mais distante chegue ao ponto considerado na bacia.

2.3 Mitigação e controle de inundações

Para possibilitar a convivência das sociedades com as inundações são tomadas medidas de controle, podendo essas serem ações de engenharia de cunho social, econômico e administrativo. O conjunto de todos esses aspectos resulta em um plano de proteção contra inundações que objetiva diminuir os riscos e os prejuízos oriundos das inundações, buscando um desenvolvimento urbano sustentável (COSTA, 2013).

No Brasil, foi criado, em 2006, o programa Drenagem Urbana Sustentável, visando promover, de forma articulada com as políticas de desenvolvimento urbano para o uso e ocupação do solo e gestão das bacias hidrográficas, o gerenciamento sustentável da drenagem urbana. O programa tem como meta viabilizar ações necessárias à implantação ou à melhoria da recuperação, prevenção, controle ou minimização dos impactos provocados por enchentes urbanas e ribeirinhas (BRASIL, 2006).

Segundo Tucci, Porto e Barros (1995), os princípios para controle de inundações urbanas são:

- considerar a bacia como sistema (as medidas não podem reduzir o impacto de uma área em detrimento a outra);
- analisar as medidas de controle no conjunto da bacia (estruturais e não estruturais);
- considerar como meios de implantação de controle de enchentes o Plano Diretor Urbana, as Legislações Municipal, Estadual e Federal e o Manual de Drenagem;

- não ampliar a cheia natural;
- seguir as normas técnicas de projeto e execução de obras de drenagem.

As medidas de controle podem ser classificadas em medidas estruturais ou não estruturais, e, geralmente, são aplicadas de forma associada (COSTA, 2013).

2.3.1 Medidas estruturais

As medidas de controle estruturais são intervenções de engenharia que, de forma estratégica, modificam o sistema fluvial visando à redução do risco e de prejuízos causados pelas inundações. Elas podem ser classificadas em extensivas ou intensivas: as medidas extensivas são aquelas que são aplicadas na bacia hidrográfica, elas têm como objetivo modificar as relações entre precipitação e vazão, um exemplo é a modificação da cobertura vegetal do solo, visando retardar os picos de enchente e controlar a erosão da bacia (BARBOSA, 2006). Já as medidas intensivas são aquelas que agem diretamente no recurso hídrico e que, segundo Canholi (2005), podem ser classificadas em quatro tipos: (a) de aceleração do escoamento; (b) de retardamento do escoamento; (c) do desvio do escoamento; (d) de ações individuais para tornar edificações a prova de enchentes.

De acordo com Tucci (2003), as medidas de controle do escoamento podem ser classificadas, em função da sua ação na bacia hidrográfica, em:

- distribuída ou na fonte, que é um tipo de controle que age sobre lotes, praças ou passeios;
- na microdrenagem, que é o controle que age sobre o hidrograma resultante de um ou mais loteamentos;
- na macrodrenagem, que é o controle feito sobre os principais recursos hídricos urbanos.

As medidas estruturais são essenciais e necessárias para solucionar grande parte dos problemas relacionados às inundações no meio urbano, um aspecto problemático destas medidas é o fato de que além de onerosas, elas não

solucionam os problemas de drenagem urbana de uma maneira eficaz e sustentável por si só, necessitando do suporte de uma compreensão integrada do ambiente urbano e das relações dos sistemas que o compõem. Outro ponto a ser ressaltado é o impacto e os riscos sociais e ambientais que estas obras de engenharia podem trazer para o local aonde são implantadas. (BARBOSA, 2006).

Técnicas de desenvolvimento sustentável para o gerenciamento das águas urbanas têm sido desenvolvidas com o intuito de obter melhores respostas ambientais, econômicas e sociais nas obras de drenagem, conhecidas como *Best Management Practices* (BMP), países em todo o mundo buscam práticas que ajudem a prevenir, minimizar ou impedir que a poluição do escoamento superficial chegue até os rios, lagos e riachos. São exemplos de BMPs os pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração, valas permeáveis, bacias de retenção e retenção, poços de infiltração e telhados verdes (COSTA, 2013; CASTRO, 2011).

O Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (*Low Impact Development – LID*), é um dos mecanismos mais aplicados no gerenciamento de bacias urbanas. Ele atua, principalmente, estimulando uma aproximação dos processos físicos, químicos e biológicos da bacia dentro de um ideal que seria de atender o seu ciclo natural, buscando minimizar os impactos ambientais e diminuir os gastos com os sistemas de tratamento. Em síntese, a abordagem que é proposta pelo LID é uma busca pela restauração das funções hidrológicas naturais da bacia, visando à proteção dos recursos hídricos e do meio ambiente de uma forma geral (COSTA, 2013; U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2000).

2.3.2 Medidas não estruturais

As medidas não estruturais são medidas de caráter preventivo. Elas buscam criar uma melhor convivência das populações com os processos de inundação, de uma maneira em que, geralmente, não envolva nenhuma obra de engenharia. São medidas não estruturais os sistemas de previsão e alerta de inundações, seguro contra inundações, zoneamento de áreas inundáveis, ordenamento legal e jurídico e a educação ambiental (COSTA, 2013).

A Tabela 5 traz exemplos de algumas medidas não estruturais, juntamente com suas características e seus objetivos.

Tabela 5 – Medidas não estruturais

Medida	Características	Objetivos
Plano diretor	Planejamento das áreas a serem desenvolvidas e a densificação das áreas atualmente loteadas.	Evitar ocupação sem prevenção e previsão.
Zoneamento	Conjunto de regras para a ocupação das áreas de maior risco de inundação. É incorporado ao Plano Diretor.	Visa à minimização futura de perdas materiais e humanas em face das grandes cheias.
Controle do desmatamento (BEG; MOHD, 1998).	Além do controle do desmatamento, o reflorestamento deve ser feito em todos locais possíveis	Prevenir a erosão e o assoreamento.
Educação Ambiental	Para ser realizado junto à população. A conservação das margens dos arroios, sua vegetação típica e taludes são essenciais.	Conscientizar a população que sofre ou poderá sofrer com as inundações.
Medidas de apoio à população (BEG; MOHD, 1998).	Lugares seguros para preservar a pessoa, a família e trabalhos. Construção de abrigos temporários, meios de evacuação, patrulhas de segurança.	Inserir nos possíveis atingidos pelas inundações um senso de proteção.
Distribuição de informação sobre as enchentes (BEG; MOHD, 1998).	Programa de orientação da população sobre as previsões de enchentes para que ela aprenda a se prevenir	Aprimorar a qualidade da assistência externa e a reduzir falhas como a falta de informações, a má avaliação das necessidades e formas inadequadas de ajuda.
Reassentamento	Reassentamento de residentes ilegais, ocupantes das margens de rios, e de residentes legais nas áreas de enchente.	Retirar a população dos locais de Risco.
Soluções de mitigação	Promover o aumento das áreas de infiltração e percolação e armazenamento temporário.	Aumentar a eficiência do sistema de drenagem à jusante e da capacidade de controle de enchentes dos sistemas.
Sistema de alerta	Sistema utilizado para prevenir a população, com antecedência de curto prazo, em eventos mais raros.	Ajudar no controle das estruturas hidráulicas no sistema do rio, e evitar o pânico.
Construções a prova de enchentes	Pequenas adaptações nas construções.	Reduzir as perdas em construções localizadas nas várzeas de inundação.
Seguro contra enchentes	Proteção econômica contra inundações	Diminuir os prejuízos individuais causados pelas inundações.
Sistemas hidrológicos	Histórico hidrológico da bacia e modelos que mostram o comportamento hidráulico e hidrológico do sistema do rio.	Fornecer subsídios para os estudos de comportamento da bacia, assim como previsão de cenários futuros.

FONTE: Adaptado de Enomoto (2004).

2.4 Mapeamento de inundações

O mapeamento das áreas de risco de inundação é de fundamental importância no controle e prevenção de inundações. O seu processo baseia-se em dados cartográficos confiáveis, com a precisa localização dos dados da bacia hidrográfica junto com as suas características hidráulicas, constituindo um material de extrema importância para decisões técnicas e possibilitando uma melhor visualização do sistema de drenagem, bem como o seu comportamento frente a diferentes cenários de inundações (ENOMOTO, 2004).

Os mapas de inundação são classificados, segundo Tucci (2003), em dois tipos:

- mapa de planejamento: mapeia áreas que são impactadas por cheias frente a diferentes tempos de retorno;
- mapa de alerta: descreve o nível a régua para pontos de controle escolhidos na área de estudo, esse mapa possibilita aos moradores acompanhar o nível em que se encontra a inundação.

2.5 Modelagem Hidrológica

2.5.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)

Os MDE são uma representação digital do relevo de uma determinada região da superfície terrestre (ALMEIDA, 2015). Com o desenvolvimento de tecnologias de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e algoritmos de processamento automático, é possível a utilização de computadores para processar dados de altimetria obtidos através de sensoriamento remoto e gerar os MDE. Os dados topográficos são usualmente manipulados sob a forma de um Modelo Digital do Terreno (MDT) ou Modelo Digital de Elevação (MDE), cuja representação é feita por uma matriz ou imagem *raster*, possuindo cada elemento matricial ou pixel um valor correspondente à elevação do terreno em relação a um determinado referencial (BURROUGH; MCDONNEL, 1998).

Segundo Almeida (2015), estes modelos podem ser utilizados para realização de várias operações como o cálculo de volumes, análise de perfis de secções transversais, a geração de mapas de declividade, exposição e drenagem. Todas

essas operações são essenciais para o planejamento, ordenamento, elaboração e implantação de projetos.

Estes modelos podem utilizar diversos interpoladores, entre os quais destaca-se o TIN, que é baseado na triangulação de uma amostra de pontos cotados feita com distribuição irregular. Essa amostra pode ser proveniente de medições realizadas sobre o solo ou extraída de forma indireta de curvas de nível ou perfis restituídos. A partir destes dados se cria uma rede de triângulos cujos vértices vão corresponder aos pontos cotados da amostra, e, por fim, geram-se superfícies planas que são limitadas por cada um dos triângulos, e sua respectiva cota (ALMEIDA, 2015).

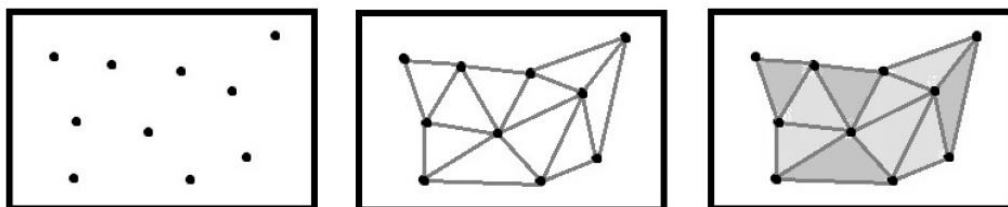


Figura 3 - Etapas do processo de construção de um modelo TIN
Fonte: Almeida, 2015.

Em estudos relacionados a drenagem urbana, os MDE são utilizados dentro de uma plataforma de SIG para derivar informações de interesse hidrológico. Desse modo, é possível, com o processamento do MDE, definir as direções de escoamento para cada elemento da matriz do modelo e, a partir disso, são calculados outros parâmetros e variáveis hidrológicas como a área de drenagem, a montante de cada célula, delimitação das sub-bacias, definição das redes de drenagem, determinação de comprimentos e declividades dos rios, entre outros (BUARQUE, 2009).

De acordo com Matos (2008), existem três problemas fundamentais no domínio dos MDT/MDE que devem ser considerados:

- A melhor maneira de fazer a modelagem do fenômeno geográfico com distribuição contínua, nomeadamente sob a forma de dados matriciais ou estruturas vetoriais;
- A quantidade de informações e a qualidade dos dados que se necessita para modelar um fenômeno para que os resultados sejam próximos da realidade o suficiente;

- As dificuldades criadas para o processamento de um volume de dados elevado, tendo em visto que os modelos de terreno podem ser dados com uma quantidade de informação muito grande, conforme o tamanho da área de estudo.

O autor ressalta ainda a importância dos modelos em diversas áreas como cartografia, engenharia civil, hidrografia, gestão de recursos naturais e proteção civil, sendo o desenvolvimento de representações do terreno a partir dos MDE um dos pontos de maior importância para os estudos na área ambiental.

2.5.2 Modelos de Inundações

Os modelos de inundações são utilizados em estudos que visam estudar os impactos e características de um evento de inundação para uma determinada área de estudo. A previsão de inundações é definida por Allaby e Allaby (1999) como uma técnica que usa de características já conhecidas de uma bacia hidrográfica e tem como objetivo prever a dinâmica, descarga e altura dos picos de inundação resultantes para uma determinada precipitação, usualmente com o objetivo de avisar as populações que estão em área de risco dentro do cenário simulado. A proposta da modelagem de inundações é trabalhar de forma integrada com tecnologias que permitam sobrepor os modelos hidrológicos e os modelos hidráulicos referentes aos sistemas de drenagem de uma determinada bacia hidrográfica.

Ao longo dos últimos cem anos, duas linhas de estudo atraíram uma maior atenção para a modelagem de inundações, são elas: os *métodos empíricos* como medições, levantamentos topográficos, sensoriamento remoto e modelos estatísticos que envolvam métodos que trabalham com bancos de dados; e os *modelos hidrodinâmicos*, que podem ser encontrados em modelos com metodologias de cálculos unidimensionais (1D), bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D). Esses modelos trabalham resolvendo equações que são derivadas da aplicação de leis da física para o movimento de fluidos e são encontrados em uma grande variedade de graus de complexidade. Mais recentemente, uma nova proposta metodológica para modelagem de inundações ganhou popularidade, com ótimos resultados para a modelagem de bacias hidrográficas de maior tamanho, esses modelos podem ser classificados como *modelos conceituais simplificados* e são baseados em uma

representação mais modesta dos processos físicos, possuindo um tempo de processamento de dados muito mais curto em comparação aos modelos hidrodinâmicos (TENG et al., 2017).

De acordo com Allaby e Allaby (1999), a modelagem hidrológica consiste no uso de modelos físicos de pequena escala, analogias matemáticas e simulações computacionais para caracterizar o comportamento hidrológico real de algum aspecto ou sistema. O objetivo da modelagem hidrológica é focar nos escoamentos individuais de um sistema hidrológico com vários parâmetros, controlando a intensidade do escoamento e das características dos solos, terreno, clima e propriedades dos recursos hídricos. Por esta razão, a precisão da modelagem depende diretamente da quantidade de parâmetros que serão incluídos no modelo e da precisão na implementação dos métodos e técnicas que vão ser empregados (ANEES, 2016).

Os métodos numéricos utilizados na modelagem de inundações incluem resoluções de cálculos para vários componentes do ciclo hidrológico, a fim de criar uma relação de precipitação-escoamento. De acordo com Annes (2016) e Rodrigues (2014), são incluídos para modelagem matemática fatores como: precipitação, evapotranspiração, interceptação, infiltração, armazenamento de água, descargas dos aquíferos e vazões dos rios.

Com base em um estudo feito por Teng et al., (2017), hoje em dia, existem diversos *softwares* que são aplicados na modelagem hidrológica com enfoque nos processos de inundações, cada qual dentro de seu *layout*, com suas vantagens e desvantagens de aplicação. A Tabela 6 traz uma lista dos *softwares* que são mais comumente utilizados hoje em dia.

Tabela 6 – *Softwares* de modelagem hidrológica

Método	Descrição	Aplicação	Tempo médio para computação	Outputs	Exemplos de modelos
1D	Solução da equação unidimensional de St-Venant	Modelagem em escala de projeto na ordem de 10s até 100s de km dependendo do tamanho da área.	Minutos	Profundidade da água, velocidade média e descarga em diferentes seções transversais.	Mike 11, HEC-RAS, ISIS, InfoWorks RS

				Extensão da inundação caso as planícies de inundação sejam parte do modelo 1D, ou por projeção horizontal do nível da água.	
1D+	1D a possibilidade de abordagem celular para a simulação do armazenamento do fluxo na planície de inundação	Modelagem em escala de projeto na ordem de 10s até 100s de km, dependendo do tamanho da área, porém, com o potencial de aumentar a escala de aplicação se usada data de seções transversais esparsas.	Minutos	Da mesma forma que os modelos 1D, mais os níveis da água e a extensão de inundação em células de armazenamento na planície de inundação.	Mike 11, HEC-RAS, ISIS, InfoWorks RS
2D-	2D menos a lei de conservação do momento para o fluxo na planície de inundação	Grande escala de modelagem e aplicações onde efeitos de inércia não são importantes.	Horas	Extensão da inundação, profundidades da água.	LISFLOOD-FP, JFLOW
2D	Solução da equação bidimensional para águas rasas.	Modelagem em escala de projeto na ordem de 10s de km. Podendo ter um potencial para uso em modelagem de larga escala se aplicado a <i>grids</i> muito grosseiros.	Horas ou dias	Extensão da inundação, profundidades da água, velocidades médias com relação a sua profundidade.	TUFLOW, Mike 21, TELEMAC, SOBEK, InfoWorks 2D
2D+	2D mais a solução vertical para velocidades usando continuidade.	Predominantemente utilizado para modelagem em ambientes costeiros, onde perfis de velocidade 3D são importantes.	Dias	Extensão da inundação, profundidades da água e velocidades 3D.	TELEMAC 3D
3D	Solução da equação tridimensional de Navier Stokes.	Previsão local das velocidades tridimensionais em canais e planícies de inundação.	Dias	Extensão da inundação, profundidades da água e velocidades 3D.	CFX

Fonte: Adaptado de Pender (2006).

O uso combinado de modelos numéricos 1D e 2D é uma forma de aumentar a qualidade dos resultados, além de poupar tempo no processamento de dados, proporcionando a realização da tarefa com o uso de menor memória do computador, fator muitas vezes limitante ao rodar modelos 2D de maior complexidade. Os resultados destes modelos são também afetados pela qualidade e complexidade dos dados de entrada referentes à topografia. Dentre os vários modelos disponíveis no mercado, o *Hydrologic Engineering Center's: River Analysis System* (HEC-RAS) se destaca por ser um *software* livre e de ampla utilidade para simulações, possuindo uma interface compatível com SIG o HEC-RAS, tendo a capacidade de simular processos hidráulicos em fluxo constante ou instável, transporte de sedimentos e modelos de temperatura da água (ANEES, 2016).

3 Metodologia

Este capítulo tem como finalidade descrever a metodologia aplicada no desenvolvimento do presente trabalho. Primeiramente, será feita uma caracterização da área de estudo e serão demonstrados os dados utilizados no trabalho. Na sequência, será exposto o delineamento experimental, nesse momento serão apresentados os métodos utilizados para obtenção dos parâmetros necessários para modelagem hidrológica, assim como a metodologia utilizada para o desenvolvimento do modelo em si.

A principal ferramenta utilizada para a caracterização da bacia hidrográfica foi o software ArcGIS, associado à sua extensão do *Hydrologic Engineering Center*, o HEC-GeoHMS. Para a modelagem hidrológica foi utilizado o programa HEC-HMS 4.2.1 e para a simulação de escoamento, o programa HEC-RAS 5.0.3.

3.1 Caracterização da Área de Estudo

O município de Pelotas localiza-se ao sul do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, na latitude $-31^{\circ} 46'19''$ e longitude $-52^{\circ} 20'33''$. Possui uma população estimada de 344.385 pessoas (IBGE, 2017) com uma área de 1.610,084 km².

A Bacia do Santa Bárbara, uma das menores bacias do município de Pelotas, é uma bacia urbanizada com uma área total de 83 km² e que possui uma altitude variada de 125m a 0m. A parte superior da bacia está localizada no Distrito de Monte Bonito, zona rural do município que tem como principais características do uso de solo a pastagem, agricultura, vegetação arbórea, mata nativa e área urbana (SILVA, 2007).

Intermediando a parte urbana (inferior da bacia), se encontra a barragem do Santa Bárbara, obra de engenharia de 1968 que foi projetada com a finalidade de atenuar a propagação de ondas de cheia à montante da zona urbana ocupada na bacia. A partir do vertedouro da barragem, se encontra o canal de drenagem artificial. Essa canalização foi feita juntamente com a obra da barragem com o intuito de forçar o escoamento da bacia para o canal São Gonçalo. Possuindo 15 km de extensão e com uma declividade média de 1%, a região da cidade cortada pela canalização é frequentemente exposta a problemas de inundação devido a suas

características físicas e topográficas de alta vulnerabilidade (SILVA, 2007). A área da bacia do Santa Bárbara é demonstrada na Figura 4.

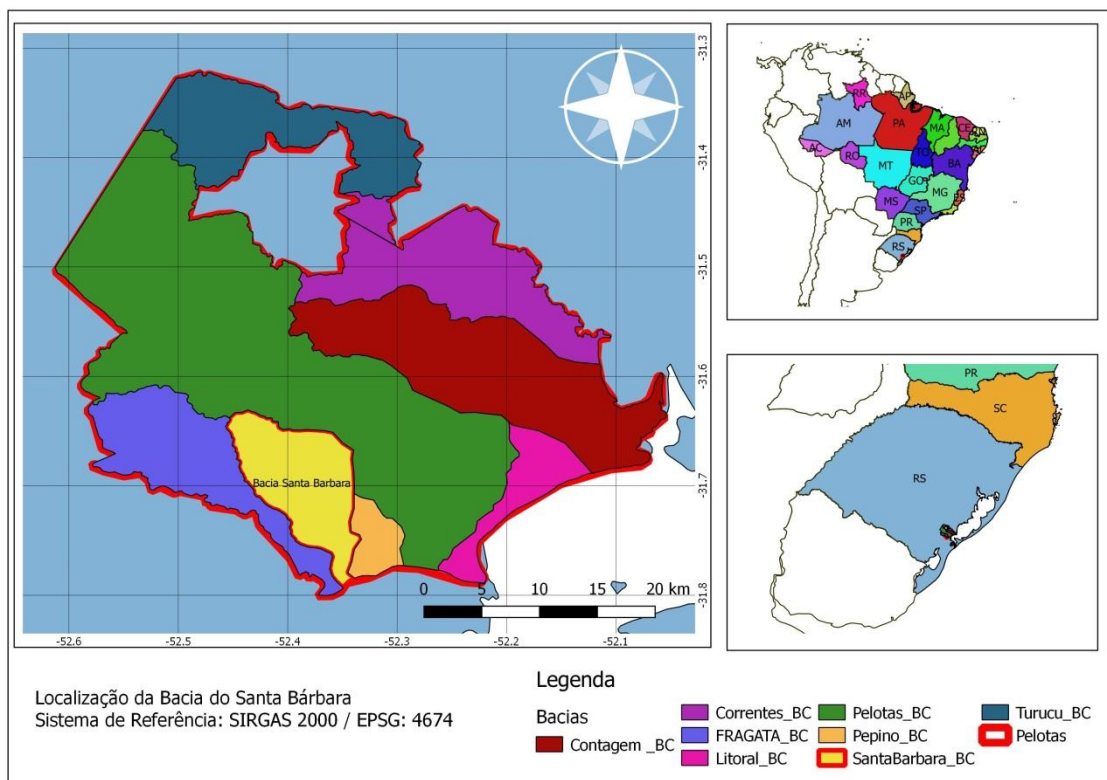


Figura 4 - Área de estudo
Fonte: Autoria própria, 2017.

A cidade de Pelotas, assim como grande parte do estado gaúcho, é muito comumente acometida por eventos severos de precipitação. Isso se dá pelo fato de o estado estar localizado em uma região que é influenciada de forma direta por diversos sistemas meteorológicos, como os sistemas frontais, formação de ciclones extratropicais e de sistemas convectivos de mesoescala (RASERA, 2014).

3.2 Dados utilizados

Na Tabela 7 são apresentados os dados empregados na pesquisa e as informações relevantes correlacionadas a eles como, por exemplo, escala, sistemas de coordenadas e o órgão gerador da informação. Os dados altimétricos utilizados para o desenvolvimento do trabalho foram cedidos pela Defesa Civil Municipal de Pelotas, oriundos da Planta Planialtimétrica da Prefeitura Municipal em escala

1:2000, Datum Vertical Imbituba SC e fazem parte do Mapa Urbano de Pelotas (MUB).

Tabela 7 – Fontes de Dados

Dados	Ano	Escala/Resolução	Sistema de Coordenadas	Origem
Pontos altimétricos – Área urbana	2004	1:2.000	SAD 69 UTM 22S	MUB PELOTAS.
Pontos altimétricos – Área rural	2010	1:50.000	SIRGAS 2000 UTM 22S / EPSG: 31982	HASENAK, H.; WEBER, E.
Hidrografia	2004	1:2.000	SAD 69 UTM 22S	MUB PELOTAS.
Uso e Cobertura de solo	2017	1:50.000	SIRGAS 2000 UTM 22S	CECCONELLO
Pedologia	2009	1:50.000	SIRGAS 2000 UTM 22S	FLORES, FILIPPINI E WREGE..
Ortofotos	2014	10 cm	SIRGAS 2000 UTM 22S	MUB PELOTAS.

Fonte: Autoria própria, 2017.

3.3 Delineamento experimental

O fluxograma do processo metodológico utilizado nesse projeto é ilustrado na Figura 5, iniciando-se com o processamento do MDE a partir dos *shapefiles* de altimetria da área de estudo. O MDE gerado é utilizado para o pré-processamento dos dados necessários ao do modelo hidrológico da bacia hidrográfica através de ferramentas do Arc Hydro ToolBar e da extensão do software HEC-HMS, o HEC-GeoHMS, que possibilita trabalhar com a determinação desses parâmetros necessários para os cálculos hidrológicos dentro do ambiente do ArcGIS.

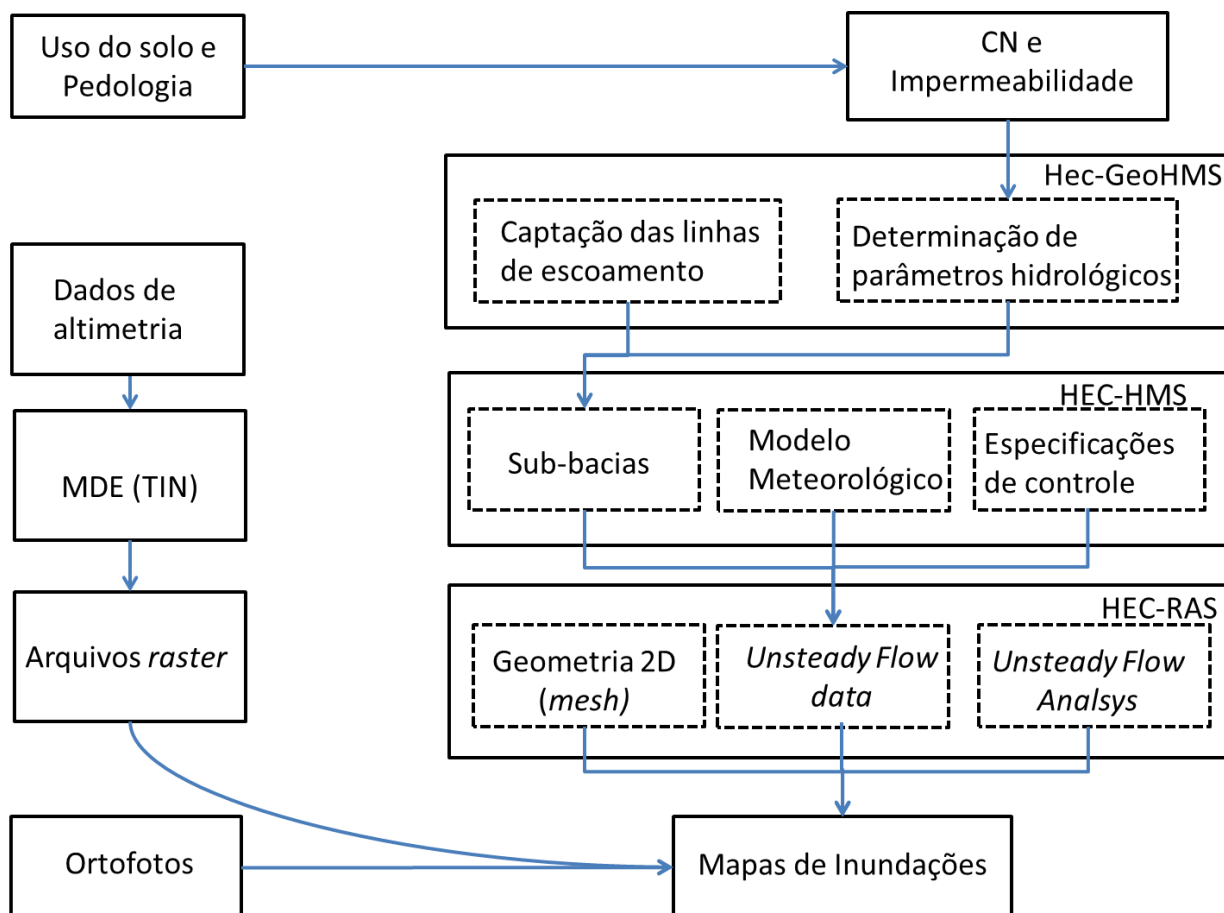


Figura 5 – Fluxograma da metodologia utilizada para modelagem hidrológica e simulação de inundações
 Fonte: Autoria própria, 2017.

O resultado do processamento do MDE pelas ferramentas citadas permite a importação de um conjunto de dados referentes à bacia hidrográfica e às principais linhas de acumulação da água para o ambiente do *software* HEC-HMS. Dentro dele é criado um projeto que é preenchido com um conjunto de valores de dados relativos à impermeabilização dos solos e parâmetros de perda e transformação da água. Dados de precipitação são também inseridos no modelo, sendo que, para esses, foram projetados vários cenários para fins de análise comparativa dos resultados finais que serão gerados no projeto, os mapas de inundação da bacia.

O programa HEC-RAS, em associação com as ferramentas de SIG são ferramentas que permitem a criação dos resultados utilizados para a análise e discussão dos cenários de inundação para uma área especificada dentro da bacia de trabalho.

Para gerar o projeto de modelagem dentro do *software*, se faz necessária a especificação e desenho da geometria a ser utilizada, assim como os valores de

vazão oriundas do escoamento superficial e as especificações de controle do projeto. Para estabelecer o terreno foi utilizado o arquivo *raster* da seção da bacia a jusante da represa do Santa Bárbara..

3.3.1 Preparação do modelo da bacia

Primeiramente, a partir do conjunto de dados vetoriais de altimetria disponível para a região de estudo, utilizando o *software* ARCGis no módulo ArcMap e seu aplicativo complementar ArcToolbox, extensão 3D Analyst, comando CreateTin, no qual foi gerado um arquivo *Triangular Irregular Network* (TIN) que possibilitou modelar a superfície heterogênea de uma forma eficiente. Posteriormente, este TIN foi transformado em um arquivo matricial (*raster*), ainda no aplicativo ArcToolBox, na extensão 3D Analyst em *Conversion* no comando TIN to Raster. Em seguida, salvou-se o projeto utilizando o sistema de coordenadas geográficas EPSG:31982 SIRGAS_2000_UTM_22S. O *raster* gerado é o MDE representativo da Bacia do Santa Bárbara, este foi processado no ambiente ArcGIS, utilizando-se da extensão HEC-GeoHMS.

O processo utilizado inclui os seguintes passos: com a finalidade de adequar as linhas de escoamento do MDE às linhas de hidrografia, esses dois arquivos são processados pela ferramenta *DEM reconditioning*, criando um arquivo MDEHC (Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente), em seguida, é feito o preenchimento das falsas depressões (*fill sinks*); a determinação da direção do escoamento (*flow direction*) define as relações hidrológicas da bacia em função da topografia, a partir dela é processada a acumulação do escoamento (*flow accumulation*) e a definição de fluxos a partir do escoamento acumulado (*stream definition*); os seguintes passos utilizados foram: segmentação dos fluxos através das confluências (*stream segmentation*); a delimitação das sub-bacias com base nos segmentos (*catchment grid delineation*); a vetorização dos segmentos em polígonos (*catchment polygon processing*) e a definição da linha de drenagem (*drainage line processing*). A partir desses dados, criou-se um projeto no qual se possibilita definir as sub-bacias a serem trabalhadas, assim como a posterior análise das características geométricas de cada sub-bacia.

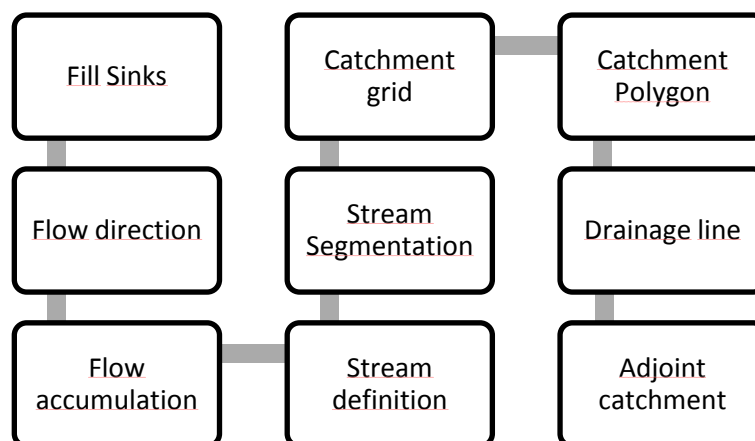


Figura 6 – Fluxograma dos processos utilizados no pré-processamento do MDE
 Fonte: Autoria própria, 2017.

3.3.2 Separação das sub-bacias, obtenção de parâmetros HEC-GeoHMS e importação do projeto HEC-HMS

Para análise do comportamento do escoamento superficial dentro da bacia hidrológica, parâmetros referentes à precipitação e armazenamento da água na barragem do Santa Bárbara foram calculados. Com o auxílio da ferramenta de análise espacial HEC-GeoHMS, a bacia foi dividida em doze sub-bacias.

A divisão das doze sub-bacias foi feita de modo que separou as bacias em: a) uma bacia rural (W1750) definida pela área que agrupa todas as linhas de escoamento que abastecem a Barragem do Santa Bárbara. b) grupo de onze bacias urbanas que tem como ponto a jusante o Canal do Santa Bárbara. A separação das bacias foi feita com a finalidade de avaliar o comportamento da barragem frente ao recebimento da vazão de escoamento superficial promovida pelos eventos de precipitação avaliados (Figura 7).

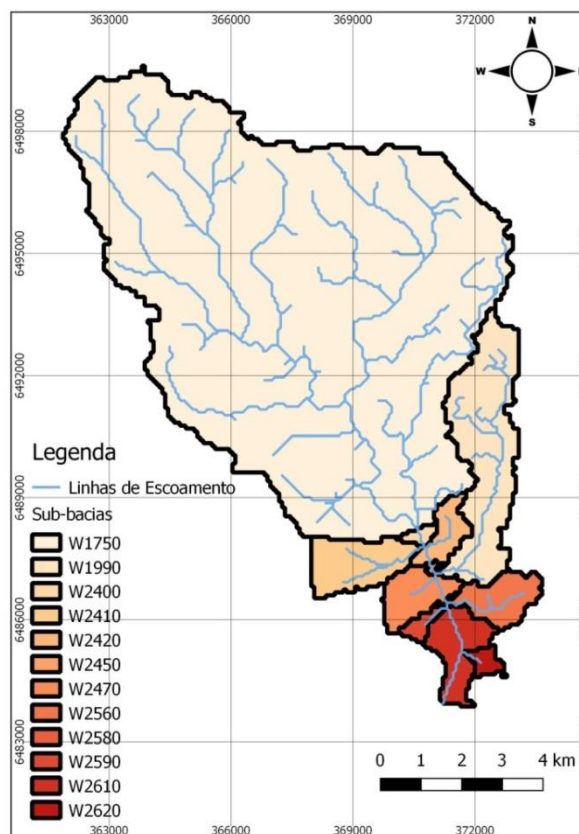


Figura 7 – Sub-bacias delineadas
Fonte: Autoria própria, 2017.

Com auxílio do *software* das ferramentas do HEC-GeoHMS, cada uma das sub-bacias e cada trecho das linhas de escoamento foram processados para obtenção dos parâmetros necessários para aplicação dentro dos processos de modelagem hidrológica. Os passos utilizados para tal foram: cálculo do comprimento das linhas de escoamento (*River Length*); cálculo da declividade das linhas de escoamento (*River Slope*); cálculo da declividade das sub-bacias (*Basin Slope*); determinação do percurso de escoamento mais longo (*Longest Flowpath*); demarcação do centroide de cada sub-bacia (*Basin Centroid*); determinação da altura do centroide (*Centroid Elevation*); e percurso de escoamento mais longo centroidal (*Centroidal Longest Flowpath*).

Após determinados todos os parâmetros anteriormente mencionados, foram especificados os processos que serão utilizados na modelagem hidrológica, então criando o projeto a ser importado para o *software* HEC-HMS. Como nessa etapa se deseja analisar somente o comportamento do escoamento superficial sobre as sub-bacias, as especificações de projeto são feitas utilizando os métodos de cálculo da perda e transformação da precipitação, *SCS Curve Number* e *SCS Unit Hydrograph*,

respectivamente. Definidos métodos de cálculo, para cada uma das sub-bacias são inseridos os valores previamente calculados através do *HEC-GeoHMS*.

As Figuras 8 e 9 mostram o ambiente do HEC-HMS, e também a possibilidade de preenchimento dos valores e métodos utilizados para o cálculo da perda e transformação da precipitação para cada uma das sub-bacias do projeto.

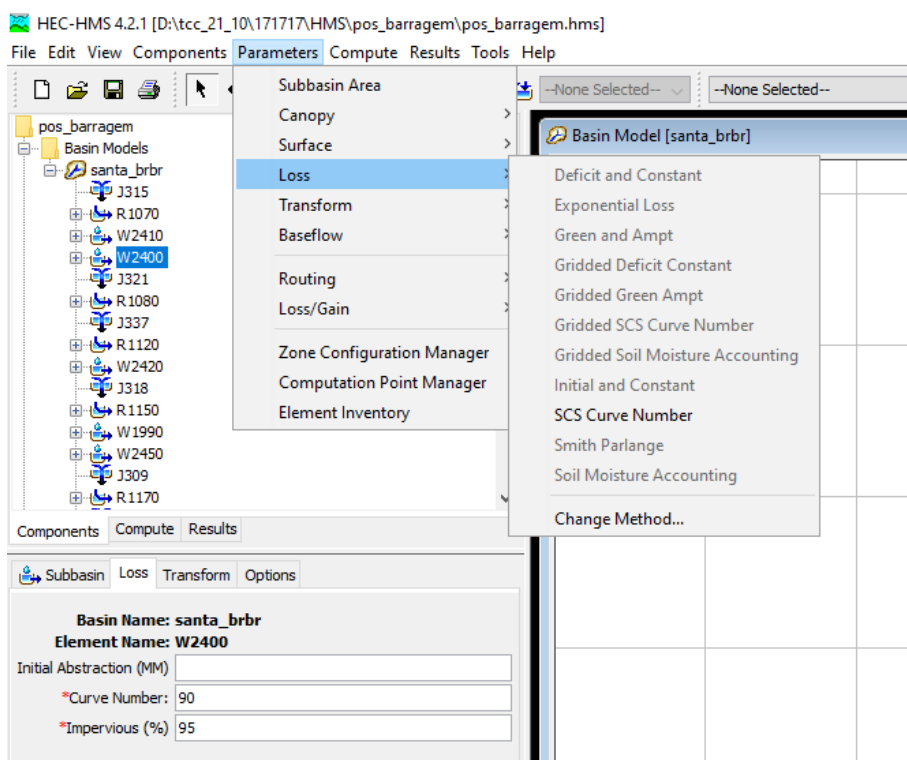


Figura 8 - Definição do parâmetro de perda
Fonte: Autoria própria, 2017.

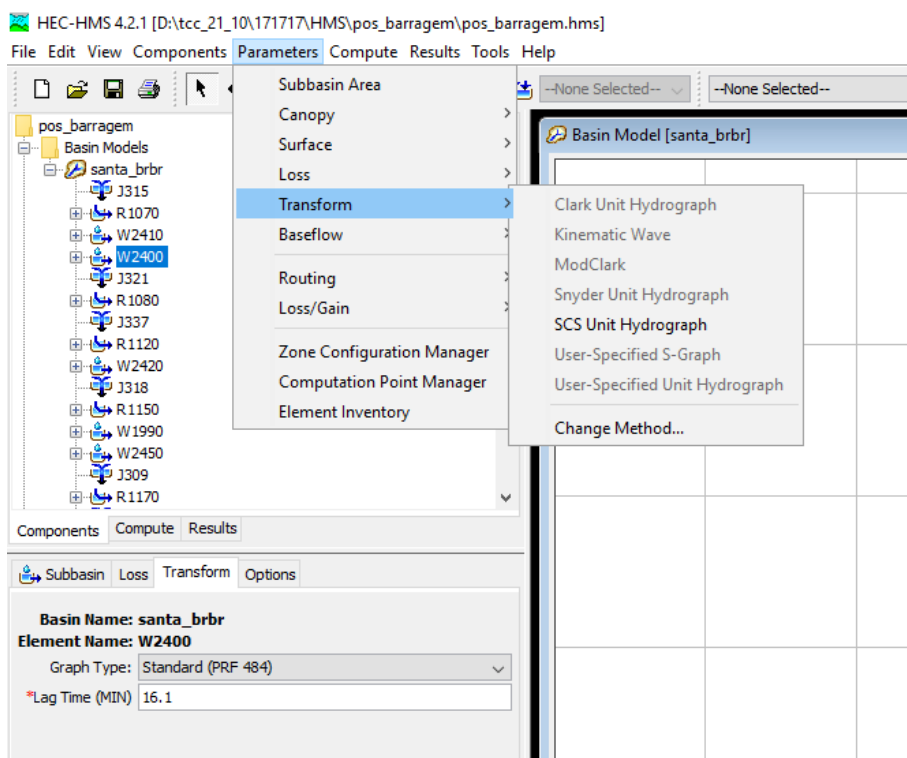


Figura 9 – Definição do parâmetro de transformação
Fonte: Autoria própria, 2017.

3.3.3 Determinação dos valores Curva Número (CN)

Os valores CN são utilizados para o cálculo dos hietogramas de chuva excedente e para a posterior determinação dos hidrogramas referentes ao escoamento superficial para cada uma das sub-bacias. Para a sua obtenção, foram avaliados os dados vetoriais relacionados aos dados de pedologia e uso de solo. Estes foram sobrepostos às ortofotos e imagens de satélite e classificados conforme suas características frente as tabelas consultadas na literatura (Tabelo 8).

Tabela 8 – Classificação do solo conforme suas propriedades de infiltração de acordo com o SCS

Grupo de solo	Características do solo
A	<p>Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8%, não havendo rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1% (Porto, 1979 e 1995).</p> <p>Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila (TUCCI et al, 1993).</p>
B	<p>Solos arenosos menos profundos que o do Grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, esse limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5m, mas é, quase sempre, presente camada densificada que a camada superficial (Porto, 1979 e 1995).</p> <p>Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundos do que o tipo A e com permeabilidade superior à média (Tucci et al, 1993).</p>
C	<p>Solos barrentos com teor total de argila de 20% a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidade de 1,2m. No caso de terras roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5m. Nota-se acerca de 60cm de profundidade, camada mais densificada que o Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade (Porto, 1979 e 1995).</p> <p>Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo (Tucci et al, 1993).</p>
D	<p>Solos argilosos (30% a 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50cm de profundidade. Ou solos arenosos como do grupo B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados (Porto, 1979 e 1995).</p> <p>Solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial (Tucci et al, 1993).</p>

Fonte: PORTO; SETZER, 1979; PORTO, 1995; TUCCI et al, 1993.

3.3.4 Determinação dos valores de impermeabilidade do solo

O mapa de impermeabilidade do solo foi construído através da comparação dos dados de uso do solo referentes a área do projeto e a Tabela 9 elaborada por Newson (1992), referente a coeficientes de impermeabilidade de solos e sua respectiva superfície. Assim como o CN, os valores de impermeabilidade do solo foram utilizados nos métodos de cálculo escolhidos para a determinação do comportamento da precipitação e a sua transformação em escoamento para as sub-bacias trabalhadas.

Tabela 9 – Valores de impermeabilização para diferentes coberturas de solo

Descrição	Impermeabilização (%)
Telhados	95
Apartamentos	95
Moradias isoladas	95
Rede viária	95
Espaço empedrado	60
Espaço alcatroado	85
Espaço florestal	20
Espaço verde urbano	20
Espaço terraplanado	20
Horta urbana	15
Clareiras	15

Fonte: Newson, 1992.

Os valores da Tabela 9 foram adaptados às informações das classes contidas nos dados vetoriais de uso do solo utilizados neste trabalho. Tais valores estão apresentados na Tabela 10, a seguir:

Tabela 10 – Valores de impermeabilização para diferentes coberturas de solo

Classe	Índice de Impermeabilização (%)
Rede Viária	95
Zona urbana	95
Espaços verdes	20
Reservatório de água	100

Fonte: Adaptado de Newson, 1992.

3.3.5 Processos de Modelagem Hidrológica

Tempo de concentração

O tempo de concentração de uma bacia hidrográfica (t_c) é a representação do tempo necessário para que toda a bacia contribua de forma simultânea para o escoamento superficial (LENCASTRE; FRANCO, 2003). Para os cálculos dos t_c , as bacias foram divididas conforme as suas características, rural ou urbana, e pela sua área de drenagem. Para definir o tempo de concentração, utilizou-se a Equação de Dodge (Equação 4).

Equação de Dodge

$$t_c = 21,88 * A^{0,41} * S_0^{-0,17} \quad \text{Equação 4}$$

Onde t_c é o tempo de concentração (min); A é a área da bacia (km^2); S_0 é a declividade média do talvegue (m/m).

Esta fórmula foi utilizada para o cálculo da bacia rural pelo fato de ser a equação encontrada na literatura que mais se adequou às características desta bacia (MELLO; SILVA, 2013).

Equação SCS Lag

$$t_c = 3,42 * L^{0,8} * \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,70} * S_0^{-0,50} \quad \text{Equação 5}$$

Onde t_c é o tempo de concentração (min); L é o comprimento do talvegue principal (km); S_0 é a declividade média do talvegue (m/km); CN é a curva-número (adimensional).

Devido as características de aplicabilidade da equação SCS Lag, este método foi aplicado para as bacias de menor porte urbanizadas (MELLO; SILVA, 2013).

A partir do valor do t_c , foram calculados os tempos de ascensão (t_a), tempo de base (t_b), tempo de pico (t_p), tempo de retardo (t_{lag}), tempo de recessão (t_e) e o

intervalo de duração (D) para a construção do hidrograma de projeto para cada uma das sub-bacias trabalhadas (Equações 6, 7 e 8).

$$t_a = t_p + D/2 \quad \text{Equação 6}$$

$$t_p = t_{lag} = 0,6 * t_c \quad \text{Equação 7}$$

$$t_b = t_a + t_e \quad \text{Equação 8}$$

Hietogramas de chuva efetiva

De acordo com Mello e Silva (2013), a intensidade da chuva está associada à duração e à frequência da chuva, sendo expressa de maneira empírica por um modelo matemático geral como na equação 9.

$$I_{m,n} = \frac{C * Tr^m}{(t_0 + t_d)^n} \quad \text{Equação 9}$$

Em que $I_{m,n}$ é a intensidade média máxima de precipitação (mm/h), t_d é o seu tempo de duração (min), Tr é o tempo de retorno (anos) e C, m e t_0 são os parâmetros a serem estimados.

Para obras de prevenção de enchentes, tem-se como dado básico a obtenção da chamada vazão de projeto, a estimativa desse dado pode ser feita a partir das curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) que são determinadas a partir de dados obtidos de pluviogramas. Goulart et al., no artigo “Relação Intensidade-Duração-Frequência das Chuvas em Pelotas, RS” (1992), obtiveram a relação IDF apresentada na Equação 10 (DAMÉ, 2005):

$$I = \frac{1253,0975 + 64,7169 * \ln(Tr)}{(t+5)^{0,8277} * Tr^{-0,018}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde: I = intensidade de ocorrência da precipitação (mm/h); T_r = período de retorno (anos); t = tempo de duração (minutos).

A obra da barragem e canalização da bacia do Santa Bárbara foi projetada para atender uma precipitação com um tempo de retorno de 100 anos (DAMÉ et al., 2005). Desta forma, os dados utilizados para a modelagem hidrológica deste trabalho foram calculados para um tempo de retorno de mesmo valor.

Segundo Mello e Silva (2013), o Hietograma de Precipitação Efetiva (Equações 11, 12 e 13), refere-se à parcela do hietograma que contribui diretamente para o escoamento superficial direto na bacia, para sua obtenção pode-se utilizar o método Curva-Número do *Soil Conservation Service* (CN-SCS). A partir dos valores calculados por este método é possível a determinação do Hidrograma Unitário Sintético Triangular (HUT) e do Hidrograma Unitário Adimensional (HUA), ambos utilizados para determinação da vazão de projeto para uma determinada bacia hidrográfica. O CN-SCS baseia-se na ideia de que existem perdas iniciais no processo de escoamento superficial que são associadas à retenção por depressões do terreno e pela cobertura vegetal (MELLO; SILVA, 2013).

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{Equação 11}$$

$$I_a = 0,2 * S \quad \text{Equação 12}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Equação 13}$$

Com o auxílio do Método dos Blocos Alternados (TUCCI, 2005) foi feita a determinação dos Hietogramas de Precipitação para cada uma das sub-bacias e, a partir desse dado, foi dada sequência à modelagem hidrológica. Devido a característica do problema, referente às determinadas peculiaridades da Bacia do Santa Bárbara, se fez necessária uma diferença de tratamento da modelagem por causa da presença do grande reservatório que é a barragem. Por tais motivos, necessitou-se realizar a aplicação de uma diferente metodologia para obtenção das vazões de projeto para: a) sub-bacia (W1750) a montante da barragem e b) demais sub-bacias a jusante da barragem.

3.3.5.1 Sub-bacia W1750

A área representada pela sub-bacia W1750 é uma área predominantemente rural dentro da bacia do Santa Bárbara. Por sua característica morfológica ser divergente do padrão das outras sub-bacias urbanas e pelo fato de que, para o escoamento desta, foi projetada a barragem com a finalidade de frenagem da vazão de pico e prevenção de inundações a jusante, a W1750 foi trabalhada em separado das demais sub-bacias.

Desenvolvido pelo SCS (1971), o modelo de Hidrograma Unitário Adimensional (HUA) fundamenta-se na análise de um grande número de HU's obtidos para bacias norte-americanas de diferentes tamanhos (NUNES, 2016). O método de HUA busca através de um hidrograma adimensional sintetizar um HU para um determinado tempo de duração de precipitação, assumindo uma única forma de representação do escoamento superficial, independente da bacia hidrográfica (RAMOS et al., 1989).

Segundo Nunes (2016), o tempo de ascensão do HUA é dado pela soma da metade do tempo de duração (D) da Pu com o tempo de retardo da bacia hidrográfica (t_{lag}). Para obtenção do HUA da W1790 foi considerada uma Pu de um mm, ocorrendo de forma uniforme sobre a sub-bacia durante um tempo D de dez minutos, sendo o t_{lag} estimado empregando a equação empírica do SCS (1971) (Equação 14):

$$t_{lag} = \frac{2,6 * L^{0,8} * (\frac{S}{25,4} + 1)^{0,7}}{1900 * X^{0,5}} \quad \text{Equação 14}$$

Onde t_{lag} é calculado em horas, L é o comprimento do curso d'água principal (m), S é o potencial de armazenamento de água no solo de acordo com o método CN e X é a declividade média da bacia (%).

Para estimar a vazão de pico (q_p) do HUA foi utilizada a Equação 15:

$$q_p = \frac{0,208 * P_u * A}{t_a} \quad \text{Equação 15}$$

Sendo q_p obtida em m³/s, P_u em mm, A em km² e t_a em horas.

Para obtenção das ordenadas do HUA, é utilizada uma equação que relaciona a vazão de um determinado intervalo com a vazão de pico (q/q_p); a razão para este intervalo é dada por uma relação entre tempo e tempo de ascensão (Equação 16):

$$\frac{q}{q_p} = \left[\frac{t}{t_a} * \exp \left(1 - \frac{t}{t_a} \right) \right]^X \quad \text{Equação 16}$$

Onde X é igual a função gama precisa do fator de pico (FP), segundo Tomaz (2013) este valor é geralmente adotado como 484 (Equação 17).

$$X = 0,8679 * \exp(0,00353 * FP) - 1 \quad \text{Equação 17}$$

A partir de tal metodologia, é calculado o HUA. Aplicando os princípios relacionados aos HU (proporcionalidade e superposição), e utilizando-se do método de convolução, é calculado o hidrograma de projeto relacionado ao Hietograma de Precipitação Efetiva da sub-bacia W1790 (Tr de 100 anos). A total vazão calculada é o dado referente à precipitação e posterior escoamento que chega na Barragem Santa Bárbara, a partir deste dado é calculada a vazão vertida pelo reservatório.

3.3.5.2 Barragem Santa Bárbara

Devido a não existência dos dados topográficos necessários para a aplicação do método mais tradicionalmente utilizado para o cálculo da propagação da onda dentro do reservatório, o Método de Puls, e também a imprescindível necessidade da simulação de tal evento para a validação do modelo da bacia, se fez necessária a utilização de outra metodologia, o Método Direto (Equação 18), desenvolvido por Hernandez (2007). Neste método, admite-se uma variação linear da vazão de entrada e da vazão de saída, dentro de um intervalo de tempo de variação linear especificado, contudo, para uma boa precisão, esse intervalo de tempo considerado é fixado com um valor pequeno (HERNANDEZ, 2007).

$$VR(t + \Delta t) = VR(t) + (QA - QE) * \Delta t \quad \text{Equação 18}$$

onde:

VR: Volume do reservatório

QA: Vazão afluente

QE: Vazão efluente

t:tempo

Estipulado um intervalo de tempo de dez minutos, através dos dados conhecidos do hidrograma de entrada, volume de água inicial, altura da água no reservatório, e a equação para o tipo de vertedor da barragem Santa Bárbara (Creager) (Equação 19), é feita a determinação do hidrograma efluente vertido para o canal Santa Bárbara.

$$Q = 2,2 * L * H^{3/2} \quad \text{Equação 19}$$

onde:

Q: Vazão

L: Comprimento da borda do vertedor

H: Altura da lâmina da água



Figura 10 – Vertedouro do canal Santa Bárbara
Fonte: Pugatch, 1982.

3.3.5.3 Sub-bacias urbanas

Além da vazão vertida a partir da barragem, o Canal Santa Bárbara, como também o restante da rede de drenagem da cidade, são responsáveis pela drenagem do escoamento superficial gerado pela precipitação que ocorre sobre a área da bacia a jusante da barragem. Para avaliação do tal escoamento, primeiramente, aplicando a mesma metodologia da sub-bacia W1750, foi determinado o Hietograma de Chuva Efetiva para cada uma das sub-bacias urbanas; em seguida, os hietogramas, junto com os dados previamente calculados, são inseridos no projeto HEC-HMS (item 3.3.2), onde dentro do ambiente do *software* são escolhidos os métodos utilizados para cálculo de transformação e perda do escoamento, obtendo-se como resultado final os Hidrogramas de Projeto para um intervalo de igual magnitude para o cálculo das vazões vertidas pela barragem.

3.3.6 Simulação de Inundações

O *software* HEC-RAS é utilizado para a simulação das inundações. Devido à diferença de qualidade existente, quando comparados os dois conjuntos de dados vetoriais de altimetria, foi feito em cima da parcela urbana do MDE, na área onde o modelo possui qualidade adequada para tal.

A partir da versão 5.0 do programa, lançada em 2016, o HEC-RAS passou a possuir a possibilidade da realização de simular modelos em dimensões 2D. De acordo com Goodell (2016), o uso de modelagem em 2D é preferível quando:

- a) A vazão tem tendência de se espalhar;
- b) Áreas urbanizadas;
- c) Grandes planícies de inundação;
- d) Áreas a jusante de uma possível ruptura de barragem;
- e) Estudos em *wetlands*;
- f) Estudos em lagos e estuários;
- g) Fendas aluviais.

Segundo o mesmo autor, os modelos 1D são preferíveis em:

- a) Locais onde a vazão não necessita se espalhar de forma significativa (vazão mantém-se principalmente em padrões unidimensionais);
- b) Sistemas de canais/bancos bem definidos;
- c) Planícies de inundação conectadas de forma simples;
- d) Situações onde se possuem dados de quantidade/qualidade limitada.

Levando em consideração as características da área de estudo, os dados obtidos, as tentativas de modelagem feitas utilizando o *software* e a avaliação da capacidade de *hardware* frente a robustez do modelo, foi considerado como sendo mais adequado para aplicação, no projeto, o uso de uma geometria 2D. Com a finalidade de possibilitar ao usuário fazer o desenho da geometria (*mesh*) e definir suas condições de borda (*boundary conditions*), assim como manipular os parâmetros a ela associados, o RAS possui uma ferramenta de SIG que possibilita, além das função supracitadas, fazer a importação de dados vetoriais, *raster* e imagens de satélite da web, como também a definição do SCG e a visualização e pós-processamento das simulações de inundação geradas no ambiente. (BRUNNER, G.W; CEIWR-HEC, 2016).

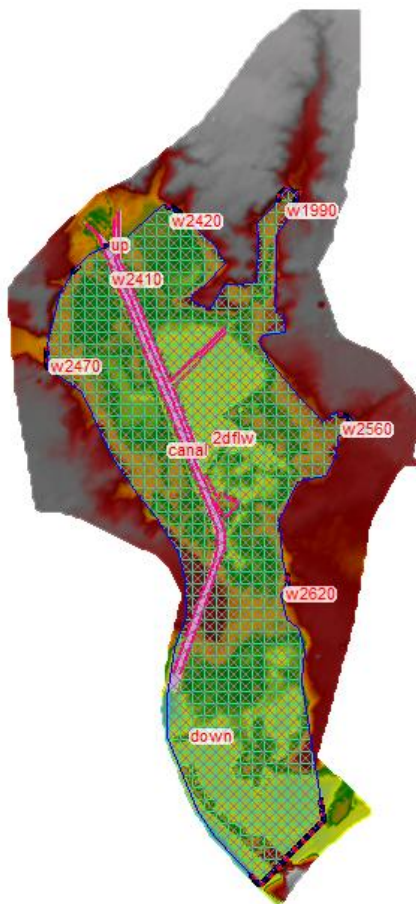


Figura 11 – Geometria 2D e *boundary conditions* desenhados no software *HEC-RAS*
 Fonte: Fonte: Autoria própria, 2017.

Para o processamento da área referente a geometria 2D, foram determinados três parâmetros: a) os parâmetros referentes ao valor padrão para rugosidade n do coeficiente de Manning; b) o espaçamento para computação de cada ponto do *mesh* no eixo X; c) o espaçamento para computação de cada ponto do *mesh* no eixo Y. Os demais parâmetros foram mantidos com os valores padrão pré-estabelecidos pelo próprio *HEC-RAS*. Esses parâmetros podem ser observados na Figura 12, abaixo. (BRUNNER, G.W; CEIWR-HEC, 2016).

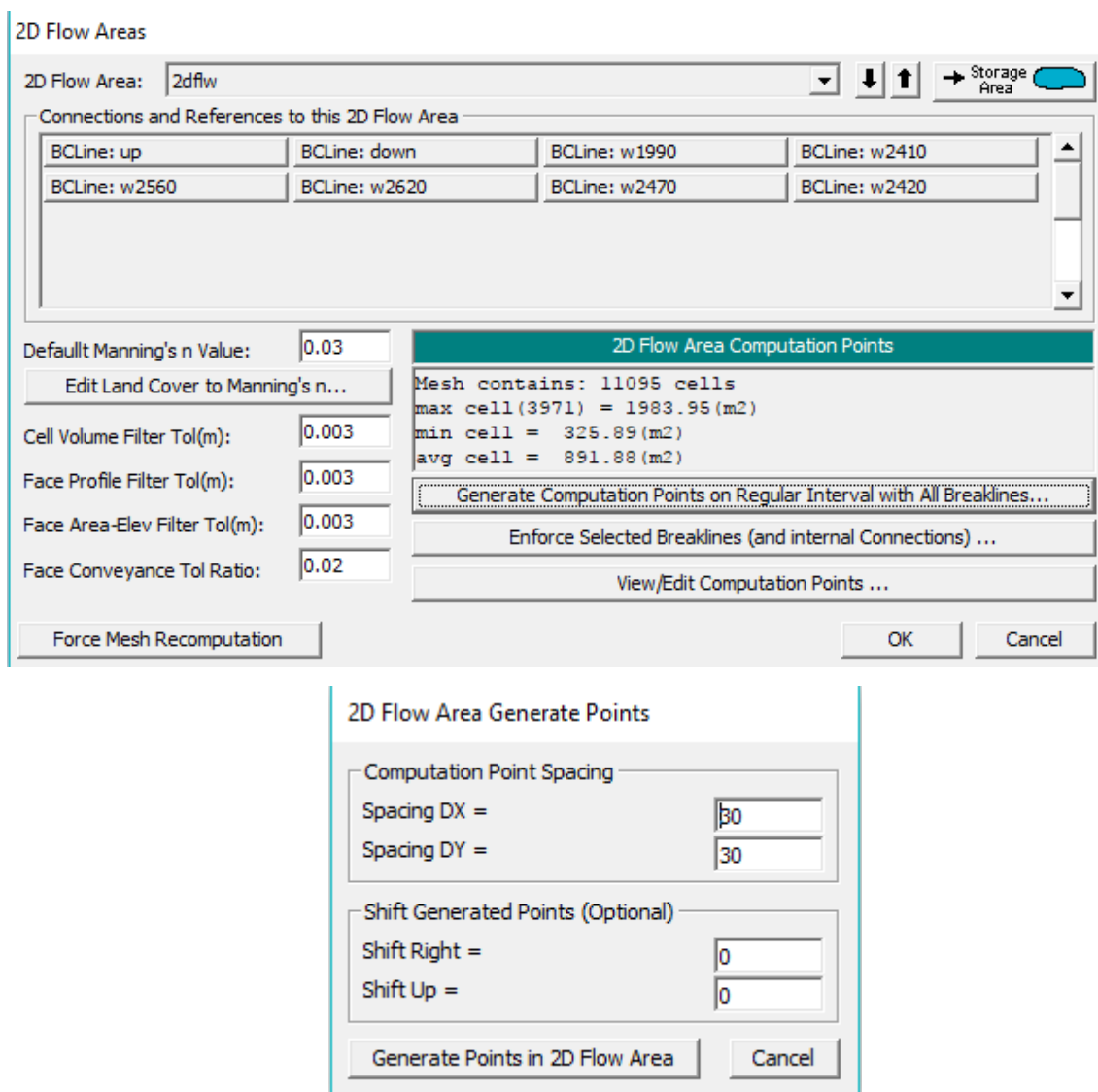


Figura 12 – Definições de parâmetros associados à geometria 2D

Fonte: Autoria própria, 2017.

Além da geometria, com o intuito de se realizar as análises de escoamento, se faz necessária a inserção dos dados de vazão (*Unsteady Flow Data*) para cada uma das linhas de entrada e saída definidos na geometria pelas *boundary conditions* (BC) (Figura 13). No caso deste trabalho, o modelo de fluxo escolhido foi o *unsteady flow* (Figura 14), com BC de entrada definidos pelos hidrogramas calculados para o vertedor da barragem (Figura 15) e para cada sub-bacia urbana, e a saída definida no perímetro do terreno onde se encontra o Canal São Gonçalo.

Unsteady Flow Data - todas_entradas

File Options Help

Boundary Conditions Initial Conditions Apply Data

Boundary Condition Types

Stage Hydrograph	Flow Hydrograph	Stage/Flow Hydr.	Rating Curve
Normal Depth	Lateral Inflow Hydr.	Uniform Lateral Inflow	Groundwater Interflow
T.S. Gate Openings	Elev Controlled Gates	Navigation Dams	IB Stage/Flow
Rules	Precipitation		

Add Boundary Condition Location

Add RS ... Add SA/2D Flow Area ... Add SA Connection ... Add Pump Station ...

Select Location in table then select Boundary Condition Type

River	Reach	RS	Boundary Condition
Storage/2D Flow Areas			
1	2dfw	BCLine: up	Flow Hydrograph
2	2dfw	BCLine: w1990	Flow Hydrograph
3	2dfw	BCLine: w2410	Flow Hydrograph
4	2dfw	BCLine: w2560	Flow Hydrograph
5	2dfw	BCLine: w2620	Flow Hydrograph
6	2dfw	BCLine: w2470	Flow Hydrograph
7	2dfw	BCLine: w2420	Flow Hydrograph
8	2dfw	BCLine: down	Normal Depth

Figura 13 – Definição de *boundary conditions*

Fonte: Autoria própria, 2017.

Flow Hydrograph

SA: 2dfw BCLine: up

☐ Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

☒ Enter Table Data time interval: 10 Minute

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

☒ Use Simulation Time: Date: 01NOV2017 Time: 00:10

☐ Fixed Start Time: Date: Time:

No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m ³ /s)
49	01nov2017 0810	08:00	46.072
50	01nov2017 0820	08:10	48.109
51	01nov2017 0830	08:20	50.08
52	01nov2017 0840	08:30	51.978
53	01nov2017 0850	08:40	53.795
54	01nov2017 0900	08:50	55.525
55	01nov2017 0910	09:00	57.161
56	01nov2017 0920	09:10	58.698
57	01nov2017 0930	09:20	60.133
58	01nov2017 0940	09:30	61.462
59	01nov2017 0950	09:40	62.682
60	01nov2017 1000	09:50	63.791
61	01nov2017 1010	10:00	64.79
62	01nov2017 1020	10:10	65.677
63	01nov2017 1030	10:20	66.454
64	01nov2017 1040	10:30	67.122
65	01nov2017 1050	10:40	67.681
66	01nov2017 1100	10:50	68.136
67	01nov2017 1110	11:00	68.488

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

☐ Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: Multiplier: EG Slope for distributing flow along BC Line: 0.01

Plot Data OK Cancel

Figura 14 – *Boundary condition* preenchida com Hidrograma do vertedor da barragem
 Fonte: Autoria própria, 2017.

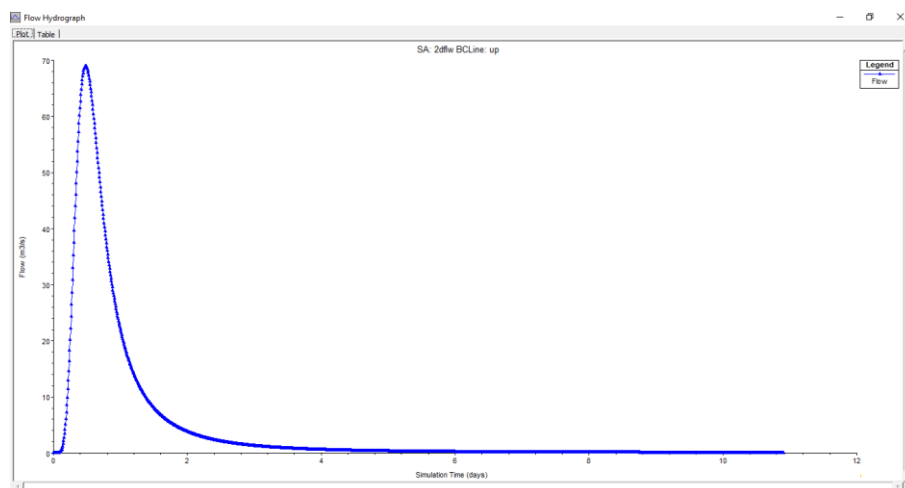


Figura 15 – Gráfico do Hidrograma do vertedor da barragem
 Fonte: Autoria própria, 2017.

Para processar a análise e resultados do modelo da simulação, foi definido um período de tempo de forma a compreender a totalidade do intervalo para que existisse um valor de vazão sendo emitida pelo vertedor da barragem. Sendo este

período intervalado de dez em dez minutos, valor de tempo igual ao das vazões calculadas pelas hidrogramas. O período admitido de forma arbitrária começa na data 01 de novembro de 2017, às 00:10, e termina no dia 11 de novembro de 2017, às 21:50 (Figura 16).

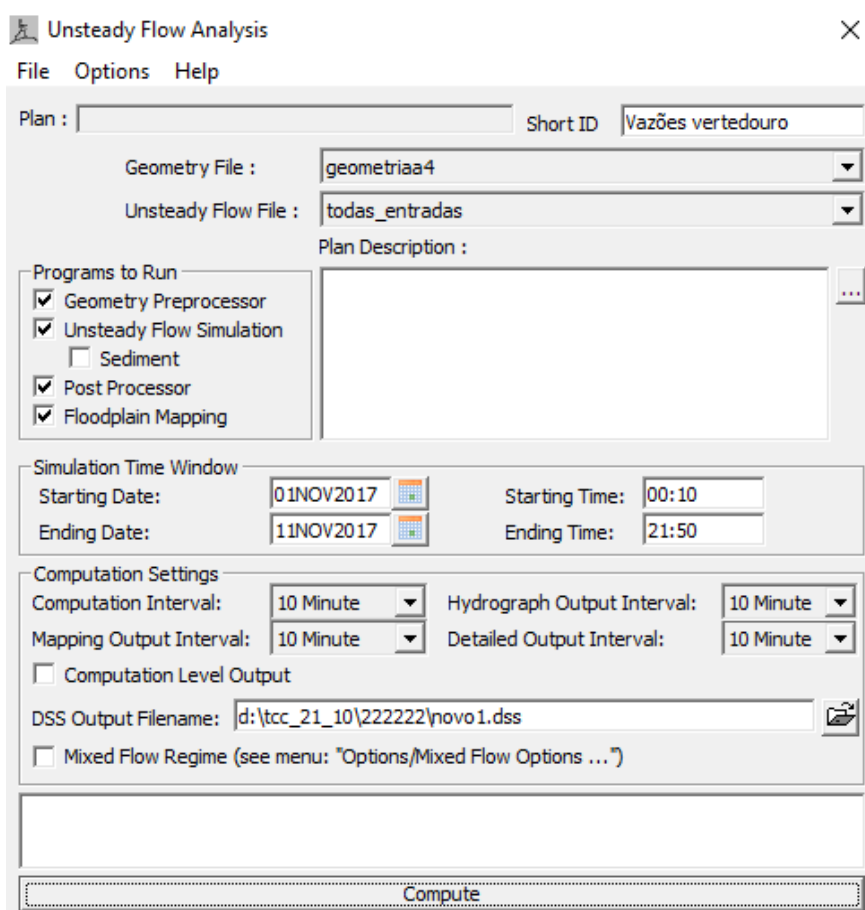


Figura 16 – Definição dos parâmetros de controle para processamento dos dados (*Unsteady Flow Analysis*)

Fonte: Autoria própria, 2017.

4 Resultados e Discussão

4.1 Modelo digital de elevação

Os MDE utilizados, tanto para a modelagem hidrológica das sub-bacias, como para a simulação das inundações, foram criados da mesma forma. Inicialmente, arquivos vetoriais de altimetria foram utilizados para criar um arquivo *Triangular Irregular Network* (TIN) que, posteriormente, foi transformado em um arquivo *raster* projetado para o sistema geodésico de referência SIRGAS 2000, projetado em UTM fuso 22S. Com a finalidade de exportar o arquivo *raster* para o *software* HEC-RAS, este teve que ser adequado para o formato TIFF, o qual é aceito pelo programa para geração do modelo de terreno.

Para realização da modelagem hidrológica, o MDE gerado para a bacia do Santa Bárbara é processado juntamente com as linhas de hidrografia da bacia para a geração do MDEHC.

4.1.1 *Triangular Irregular Network* (TIN)

A construção dos TIN foi feita a partir de duas fontes diferentes de dados: os dados da zona urbana (1:2.000), extraídos do MUB de Pelotas (LIMA, 2016;), e os dados faltantes para completar a área da bacia (1:50.000), extraídos do trabalho de Hasenak e Weber (2010). Estes valores de altimetria são processados pela ferramenta de criação de TIN, dentro do *software* ArcMap, e transformados em uma rede triangular irregular representativa do terreno da área processada.

Em princípio, tentou-se realizar a modelagem para a bacia como um todo, porém, a utilização do conjunto destes dois dados gerou uma grande desproporcionalidade de qualidade de resultado quando comparadas as duas áreas. Apesar desta falta de qualidade no modelo de terreno da parte rural, este fator não veio a interferir na modelagem de inundação do projeto, visto que, para a análise posterior no ambiente HEC-RAS, é possível utilizar a geometria referente somente a parcela contida no meio urbano.

Durante a avaliação do terreno e dos modelos gerados no HEC-RAS, verificou-se alguns pontos nos quais o arquivo TIN necessitava de uma modificação para representar de uma forma mais verdadeira as simulações propostas pelo trabalho, como, por exemplo, a falta de alguns pontos cotados para maior

composição das planícies de inundação à oeste do canal Santa Bárbara e a obstrução do escoamento nos locais onde se encontram as pontes e avenidas que cruzam o canal. Esses pontos foram identificados como problemas à representação real do modelo de inundação.

Devido à inexistência de dados para aumentar a área do terreno à oeste do canal, e pelo fato de que o escoamento superficial tende a se dirigir no outro sentido, o terreno foi mantido com a mesma dimensão; já para a questão das pontes, utilizando-se da ferramenta de edição de arquivos no formato TIN do *Arcmap*, as cotas representativas das pontes foram substituídas por valores similares aos valores cotados no leito do canal a montante e a jusante da área das pontes.

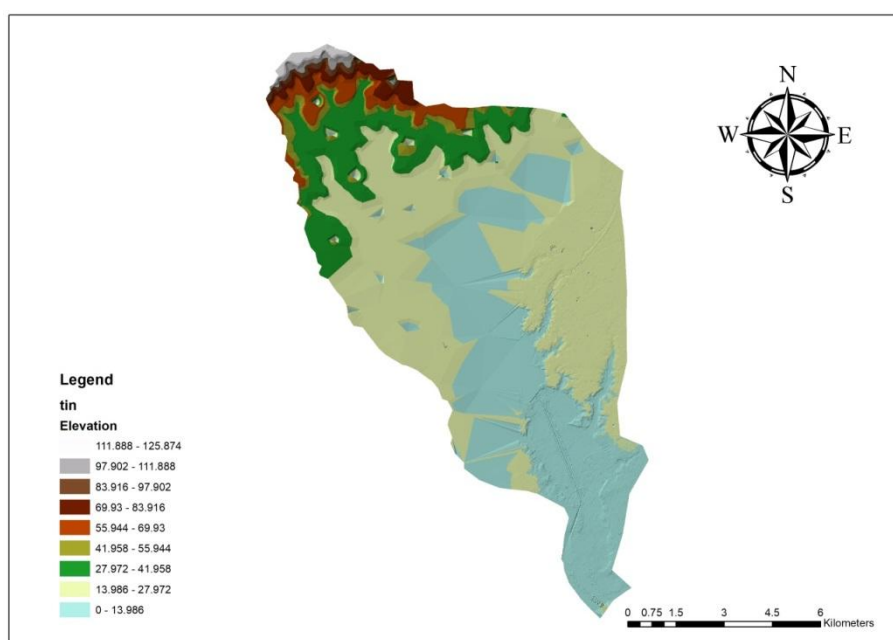


Figura 17 – Modelo de Digital de Elevação (MDE)

Fonte: Autoria própria, 2017.

4.1.2 TIN to Raster

Da mesma forma realizada para a geração do TIN, a geração dos dados *raster* foi feita utilizando a mesma ferramenta do *Arcmap* (*3D Analyst > Tin to Raster*). Considerando que os processos de modelagem hidrológica das sub-bacias, quando comparados com os processos simulações de inundação, podem ser executados mais rapidamente e com obtenção de um resultado de mesma qualidade utilizando um dado matricial com menor qualidade, a transformação dos arquivos

TIN foi feita da seguinte maneira: a) para a análise do modelo hidrológico o *raster* foi criado a partir do valor padrão do *software* Observations: 250 (Figura 18); b) para a realização das simulações de inundação foi criado o *raster* com o parâmetro Cellsize: 10 (Figura 19).

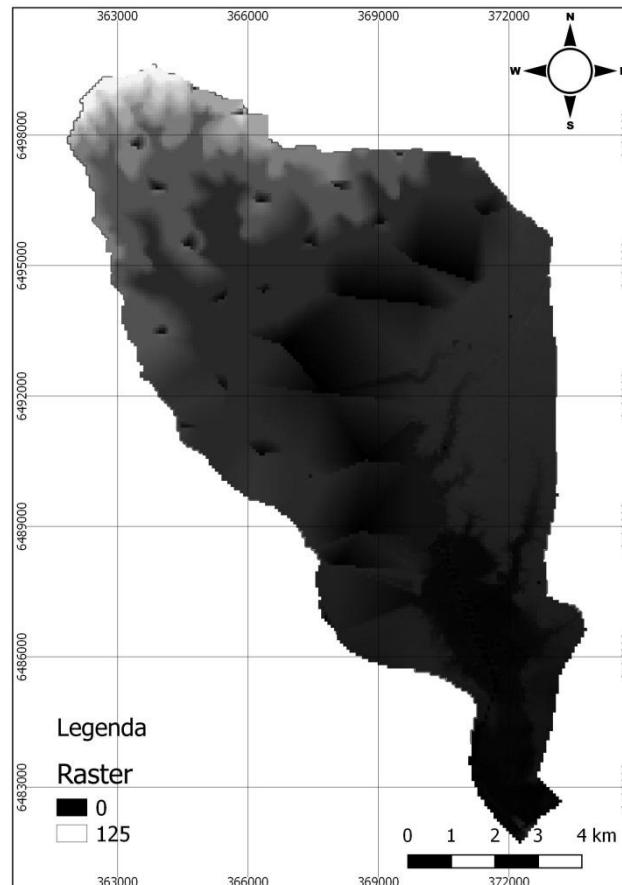


Figura 18 – Raster da bacia contendo as variações altimétricas

Fonte: Autoria própria, 2017.

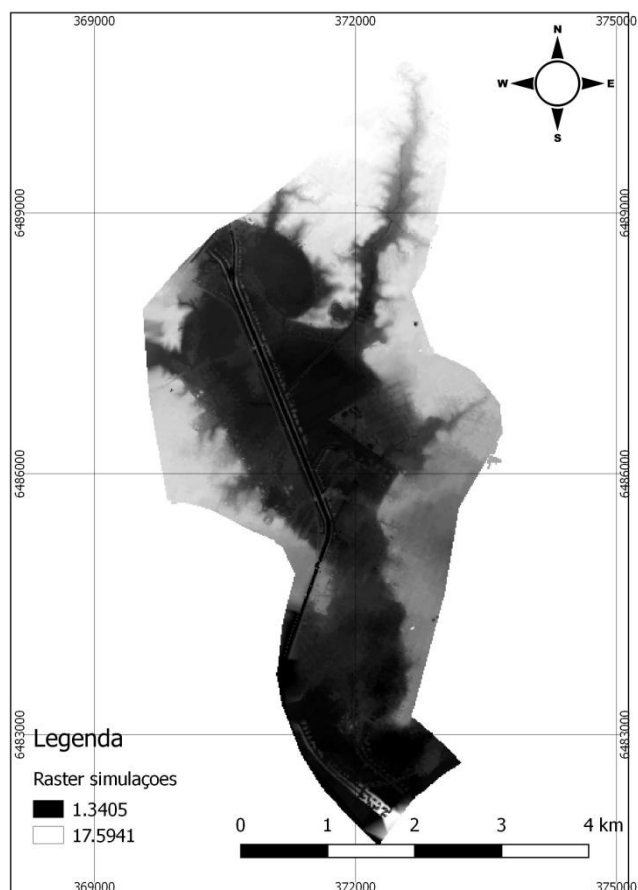


Figura 19 – Raster da área urbana da bacia contendo as variações altimétricas.

Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2 HECGeo-HMS

Com a finalidade de delinear as sub-bacias e as linhas principais de acumulação de água na bacia do Santa Bárbara, o arquivo *raster* da topografia, em conjunto com um dado vetorial da hidrografia da bacia são processados no ambiente SIG do *Arcmap*, utilizando-se da sua extensão *HEC-GeoRas*. A partir dos dados acima mencionados, são gerados uma série de arquivos *raster* e arquivos vetoriais representantes do comportamento do escoamento na bacia, assim como as principais linhas e o delineamento das áreas representativas de suas áreas de contribuição.

Após analisados os processos a serem utilizados, e feita a determinação dos valores e critérios para o processamento de um modelo hidrológico representativo admissível dentro da capacidade de *hardware* possuída para tal, foi criado o projeto de modelagem hidrológica conforme os passos citados nos itens 3.3.1 e 3.3.2.

A partir dos dados da direção (Figura 20) e acumulação (Figura 21) do escoamento ao longo da bacia, são realizadas todas as etapas do pré-processamento *HEC-GeoHMS*, esquematizado na Figura 6. Com posse de todos os dados gerados na etapa de pré-processamento, é apontado o ponto do exutório da bacia e é gerado o projeto onde é feito o delineamento e cálculo de parâmetros relacionados às linhas de escoamento e às sub-bacias.

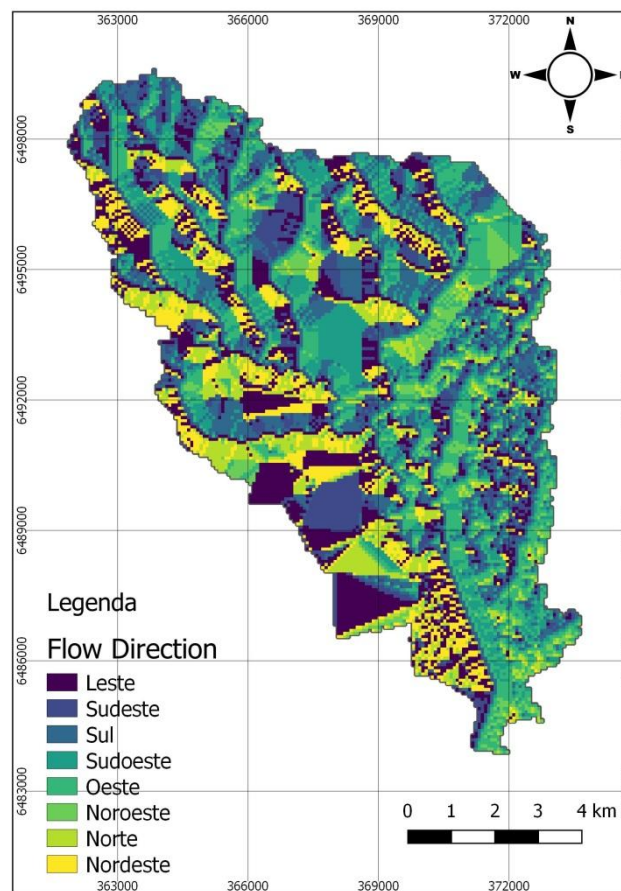


Figura 20 – Direção de Fluxo
Fonte: Autoria própria, 2017.

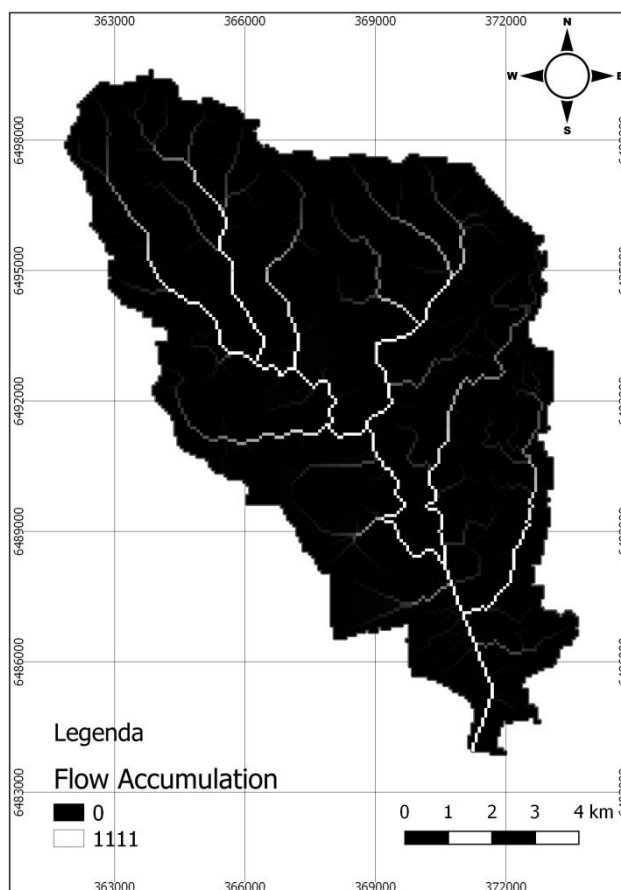


Figura 21 – Acumulo de fluxo na área de estudo

Fonte: Autoria própria, 2017.

4.3 Mapa de Declividade

Com a finalidade de calcular os parâmetros de declividade associados às sub-bacias e linhas de escoamento previamente delineadas na etapa de pré-processamento do MDE, utilizou-se a ferramenta do *ArcMap* (*ArcToolBox* > *Arc Hydro Tools* > *Terrain Preprocessing* > *Slope*). E para realização da tarefa de criação do arquivo *grid*, com os valores de declividade, foi usado como dado de entrada o *raster* do MDE.

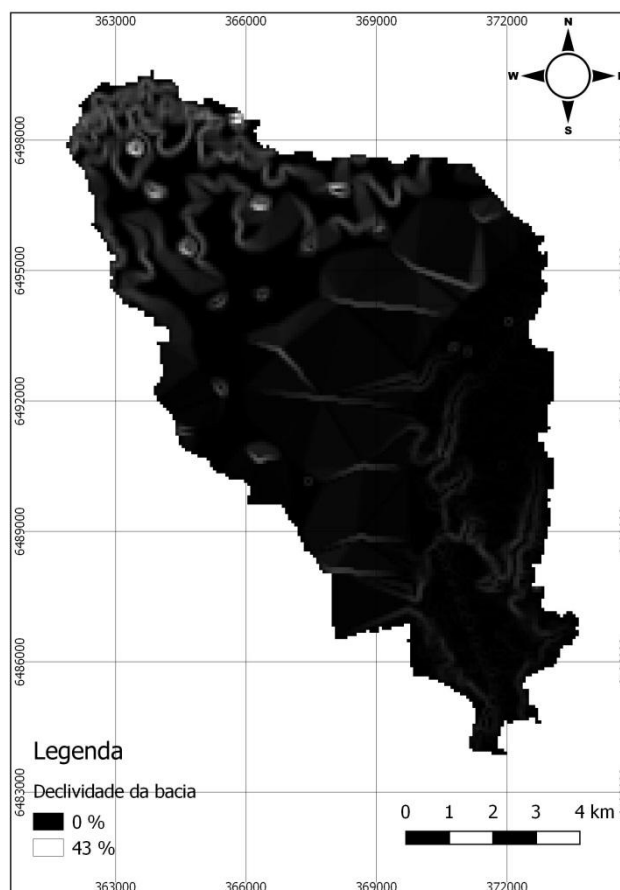


Figura 22 – Mapa de declividade
Fonte: Autoria própria, 2017.

4.4 Preparo dos dados para importação para ambiente HEC-HMS

Nesta etapa, são realizados todos os cálculos e análises necessárias para a importação do projeto para o *software HEC-HMS*, todos os processos citados no item 3.3.2, assim como as especificações de controle associados aos modelos meteorológico e hidrológico para avaliação do escoamento superficial são realizadas, e, em seguida, é criado o projeto no formato.hms (Figura 23).

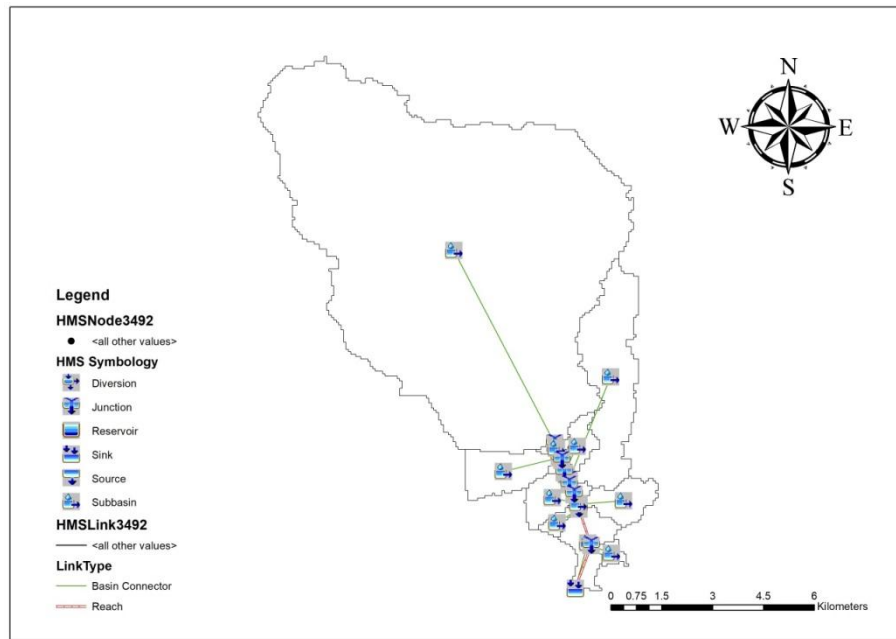


Figura 23 - Escoamento superficial no formato .hms
 Fonte: Autoria própria, 2017.

4.3 CN e Impermeabilidade dos solos (IS)

Os valores CN e IS são utilizados pelo método SCS no cálculo da perda de precipitação que antecede o início do escoamento superficial. Como este é o método utilizado para tal cálculo, eles são necessários para o preenchimento de dados no *software* de modelagem hidrológica.

Para gerar tal informação, foram analisados os dados de pedologia (Figura 24) e uso de solo (Figura 25) para área de cada uma das sub-bacias e, a partir desta análise, em comparação com os valores de tabelas apontadas pela literatura consultada, cada sub-bacia foi atribuída com um valor de CN e IS (%). Com a finalidade da determinação da classificação dos solos, utilizou-se a Tabela 11.

Tabela 11 – Classificação dos solo presentes na bacia conforme suas propriedades de infiltração de acordo com o SCS

Classes de Solos	Classificação
Argissolo vermelho-amarelo distrófico + Argissolo vermelho-amarelo eutrófico (pVad7)	D
Planossolo háplico eutrófico + Planossolo nátrico órtico + Gleissolo melânico eutrófico (SXe13)	C
Gleissolo melânico eutrófico + Organossolo indisc (gmve15)	C
Gleissolo melânico eutrófico + Organossolo misico sáprico + Neossolo flúvico eutrófico (gmve16)	D
Planossolo háplico eutrófico + Argissolo acinzentado eutrófico (SXe2)	D
Espodossolo humilúvico hidromórfico (EKg1)	A

Fonte: Autoria própria, 2017.

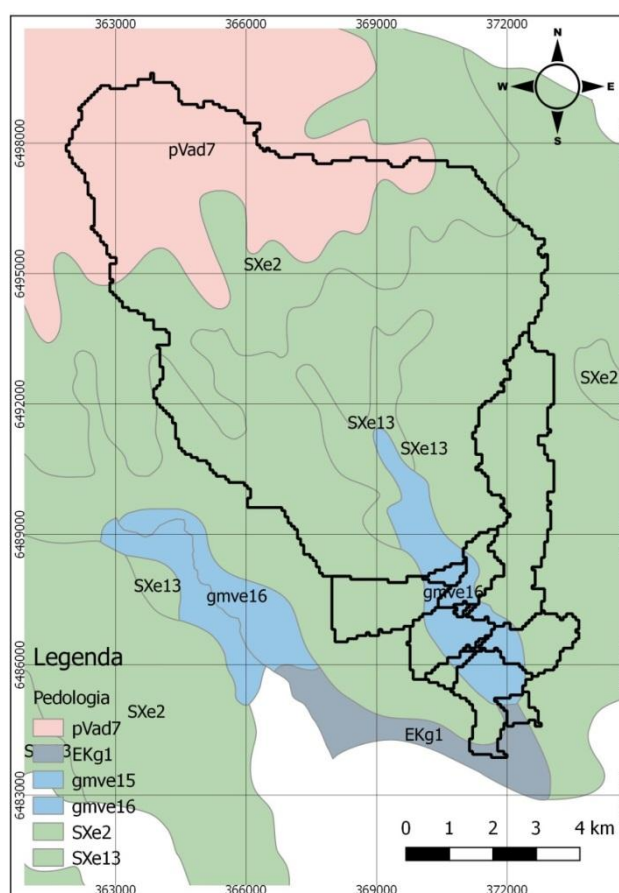


Figura 24 – Mapa de solo (pedologia)
Fonte: Autoria própria, 2017.

A partir da análise dos mapas, tabelas e do cálculo dos parâmetros hidrológicos utilizados pelo modelo hidrológico proposto foram obtidos os valores disponibilizados na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros hidrológicos calculados

Nome da Bacia	CN	S (mm)	tc (min)	tc (h)	tLag	Impermeabilidade (%)
W1750	80	63.5	315.3	5.3	5.0	35.0
W1990	90	28.2	100.2	1.7	1.0	78.5
W2400	90	28.2	26.9	0.4	0.3	95.0
W2410	90	28.2	49.1	0.8	0.5	95.0
W2420	90	28.2	39.9	0.7	0.4	95.0
W2450	90	28.2	12.4	0.2	0.1	95.0
W2470	90	28.2	47.3	0.8	0.5	95.0
W2560	90	28.2	50.9	0.8	0.5	95.0
W2580	90	28.2	16.8	0.3	0.2	95.0
W2590	90	28.2	27.3	0.5	0.3	95.0
W2610	85	44.8	47.3	0.8	0.5	95.0
W2620	85	44.8	32.4	0.5	0.3	95.0

Fonte: Autoria própria, 2017.

4.4 Modelagem hidrológica

Os dados de modelagem hidrológica foram gerados através da combinação de métodos tradicionais de hidrologia com a análise espacial feita utilizando-se os SIG e suas extensões do HEC. A metodologia utilizada está descrita 3.3.5.3, a Tabela 13 mostra os resultados obtidos.

Tabela 13 – Parâmetros hidrológicos calculados

Nome da Bacia	Área (km²)	L(m)	L(km)	Declividade da bacia (%)	Declividade (m/m)
W1750	78.9	15800	15.8	2.35	0.02
W1990	8.2	8534.6	8.5346	0.98	0.01
W2400	0.3	945.8	0.9458	0.73	0.01
W2410	2.9	3201.9	3.2019	1.27	0.01
W2420	1.3	2579.6	2.5796	1.58	0.02
W2450	0.1	296.3	0.2963	0.81	0.01
W2470	1.9	2624.3	2.6243	0.96	0.01
W2560	1.9	3016	3.016	1.01	0.01
W2580	0.1	454.9	0.4549	0.74	0.01
W2590	0.4	1441.8	1.4418	1.62	0.02
W2610	2.3	3076.6	3.0766	1.32	0.01
W2620	0.4	1483.9	1.4839	1.00	0.01

Fonte: Autoria própria, 2017.

4.4.1 W1750

A partir da curva IDF da cidade de Pelotas (GOULART et al., 1992), e do valor CN determinado para a sub-bacia W1750, foram determinados os hietogramas de projeto e chuva efetiva para sua área.

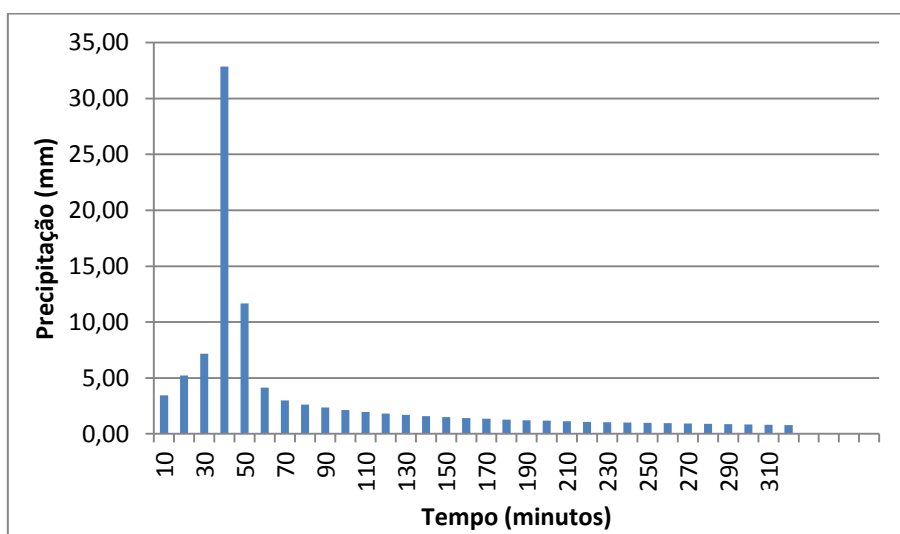


Figura 25 - Hietograma de projeto para o tempo de retorno de 100 anos

Fonte: Autoria própria, 2017.

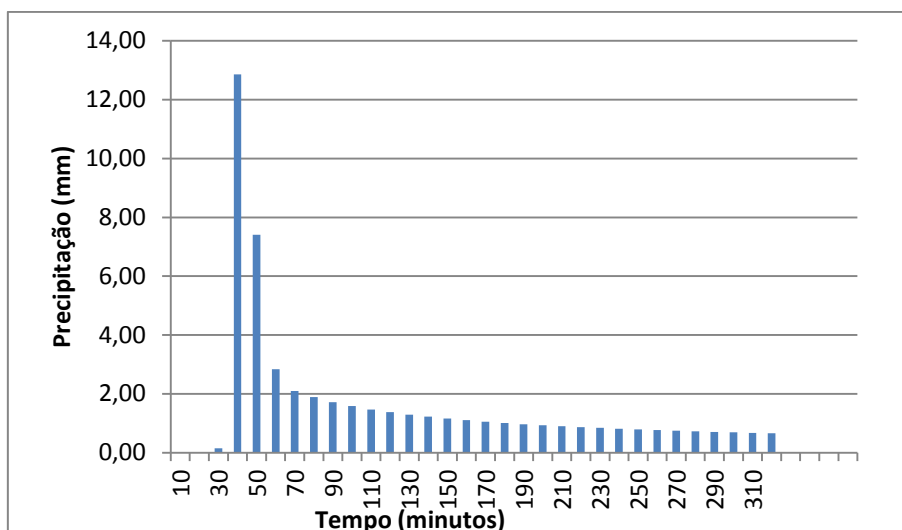


Figura 26 – Hietograma de chuva efetiva da sub-bacia W1750

Fonte: Autoria própria, 2017.

O HUA para uma precipitação unitária (1mm) foi calculado a partir do método descrito no item 3.3.5.1.

Com a finalidade de se obter o hidrograma referente à vazão total produzida pela precipitação calculada no Hietograma de Chuva Excedente, foi utilizado o método da convolução (TUCCI, 1995). A vazão total de chegada à Barragem pode ser observada na Figura 28.

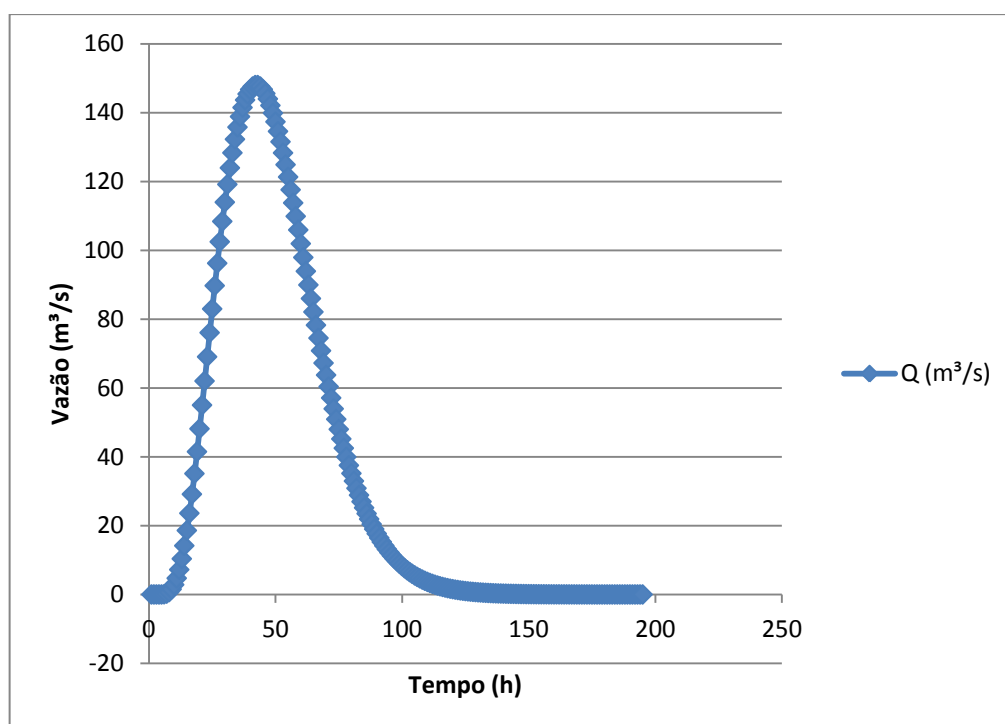


Figura 27 – Vazão de chegada na Barragem

Fonte: Autoria própria, 2017.

Por fim, para analisar o comportamento da frenagem da vazão de pico devido a presença da Barragem do Santa Bárbara, utilizando as estimativas mencionadas na metodologia do trabalho e com a aplicação do Método Direto, obteve-se o resultado apresentado na Figura 29.

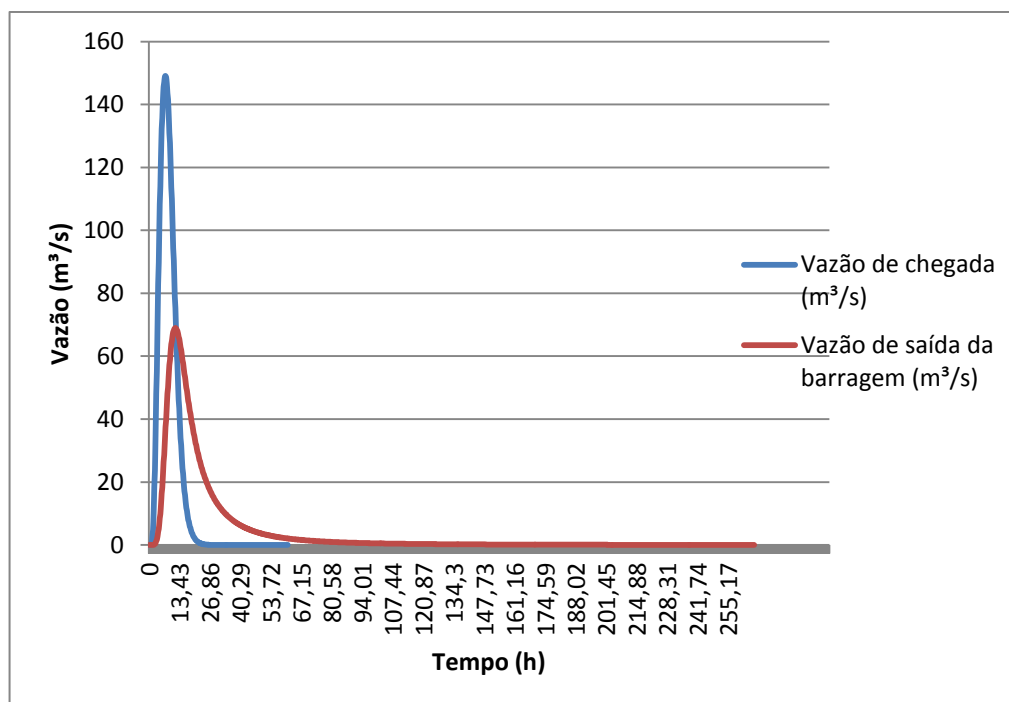


Figura 28 - Comportamento do amortecimento da vazão de pico
Fonte: Autoria própria, 2017.

O resultado calculado a partir da utilização do Método Direto se mostrou adequado frente a análise do comportamento dos hidrogramas gerados em relação ao padrão consultado na literatura. Como se pode observar, existe uma redução significativa na vazão de pico e distribuição do hidrograma ao longo do tempo, relação essa que demonstra a funcionalidade esperada para a presença da barragem.

4.4.2 Bacias Urbanas – HEC-HMS

A obtenção dos valores de escoamento superficial (Figura 30) das sub-bacias urbanas foi feita através do uso do *software* HEC-HMS; a partir do projeto gerado dentro do ambiente de SIG *Arcmap*, pela análise de dados feita com sua extensão HEC-GeoHMS, são determinados os métodos de cálculo para perda e transformação.

Para cada uma das sub-bacias são inseridos, no modelo da bacia, os dados das Tabelas 12 e 13 calculados previamente. Para preenchimento do modelo meteorológico, foi inserido, para cada uma das sub-bacias, o hietograma de projeto calculado para o tempo de retorno igual a cem anos (Figura 26) a partir da equação IDF do município de Pelotas.

As especificações de controle, exigidas pelo programa, determinam o período total e o intervalo de tempo utilizado para o qual será calculado o modelo hidrológico. Em função dos dados presentes serem dados calculados a partir de equações empíricas, com caráter de projeto, a data e horário determinados para as especificações de controle foram determinados de forma arbitrária, respeitando somente o mesmo intervalo de tempo utilizado para os cálculos das vazões vertidas pela barragem.

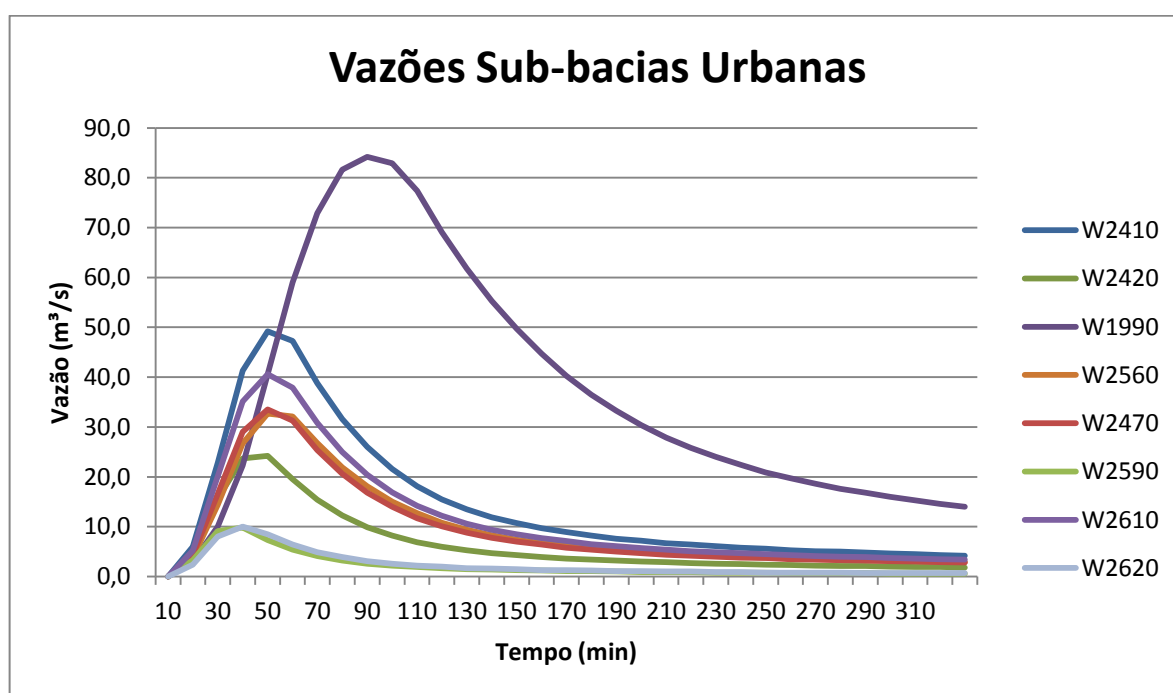


Figura 29 – Vazões das sub-bacias
Fonte: Autoria própria, 2017.

4.5 Simulação de inundações - HEC-RAS

A partir da importação do arquivo *raster* gerado para avaliação das simulações, foi determinado o terreno a ser utilizado. Sobre o terreno foi desenhada a geometria 2D, assim como as condições de borda (*boundary counditions*),

posteriormente preenchidas com as vazões de entrada do vertedor da barragem e das vazões de escoamento superficial para cada uma das sub-bacias urbanas.

Para o preenchimento dos valores do coeficiente n de rugosidade de Manning, criou-se um arquivo vetorial com os polígonos representantes da área do canal, áreas verdes e área urbanizada. Para cada tipo de cobertura foi atribuído o valor do seu coeficiente de rugosidade e o arquivo foi importado no HEC-RAS como dado de cobertura do solo (*Land Cover*), sendo este associado ao terreno e a geometria.

Tabela 14 – Coeficiente de rugosidade de Manning

Áreas delimitadas	Coeficiente de rugosidade de Manning
Canal Santa Bárbara	0.1
Áreas verdes	0.03
Áreas urbanizadas	0.013

Fonte: Adaptado de Chow (1959).

Após verificação dos dados preenchidos, a simulação foi feita para três planos distintos: a) um plano com todas as vazões; b) um plano somente com o escoamento superficial das sub-bacias urbanas e c) outro plano somente com a vazão do vertedor. As figuras 31, 32 e 33 representam os valores máximos de altura de lâmina da água presentes para cada um dos *pixels* associados a geometria utilizada na simulação; os *links* com os vídeos contendo todo o intervalo das simulações se encontra indexado no Apêndice A.



Figura 30 - Plano com todas vazões
 Fonte: Autoria própria, 2017.

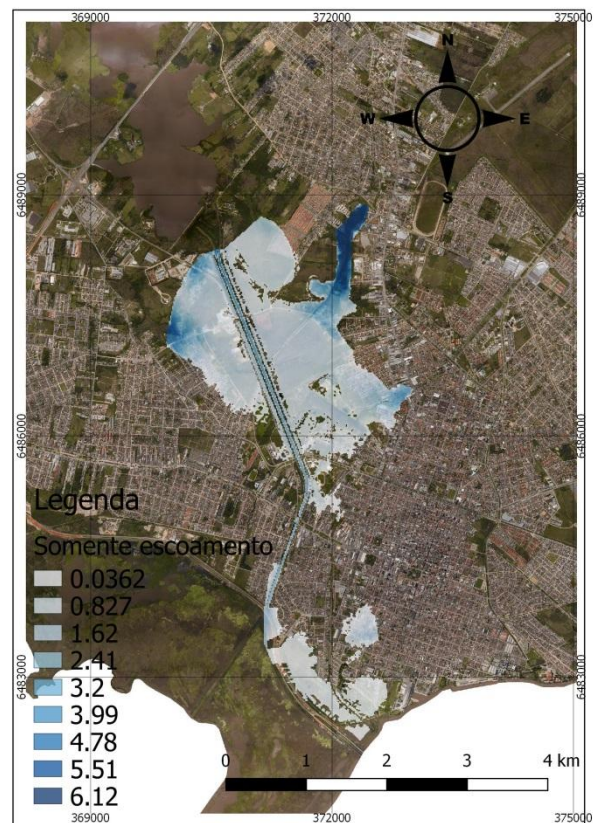


Figura 31 - Plano somente com o escoamento superficial das sub-bacias urbanas
 Fonte: Autoria própria, 2017.



Figura 32 - Plano somente com a vazão do vertedor

Fonte: Autoria própria, 2017.

As três simulações realizadas têm uma resposta muito semelhante dos perfis de lâmina da água sobre o terreno, variando somente quanto à intensidade das vazões de entrada advindas dos três cenários diferentes.

Com as informações geradas a partir das simulações, é possível verificar que as áreas que mais sofrem com as inundações na cidade estão posicionadas nas margens do canal, na região mais baixa ao sul, ou sobre o antigo leito do arroio Santa Bárbara. Essa informação se justifica por razões topográficas e pode ser validada quando comparada a dados de eventos acontecidos em Pelotas.

4.6 Comparações com eventos de inundação

A partir de dados desenvolvidos no trabalho de Oliveira (2017), foi possível realizar a sobreposição dos modelos de inundação construídos com pontos da bacia que sofreram com inundações em eventos ocorridos nos anos de 1987, 1990 e 2004 (Figura 34). Pelo fato de que a área de inundação simulada ocorre sobre quase todos os pontos indicadores dos locais acometidos pelas inundações, verificou-se

que a metodologia, assim como os valores calculados utilizados nas simulações, estão de acordo, pelo menos de forma qualitativa, com relação a estes eventos ocorridos no passado.

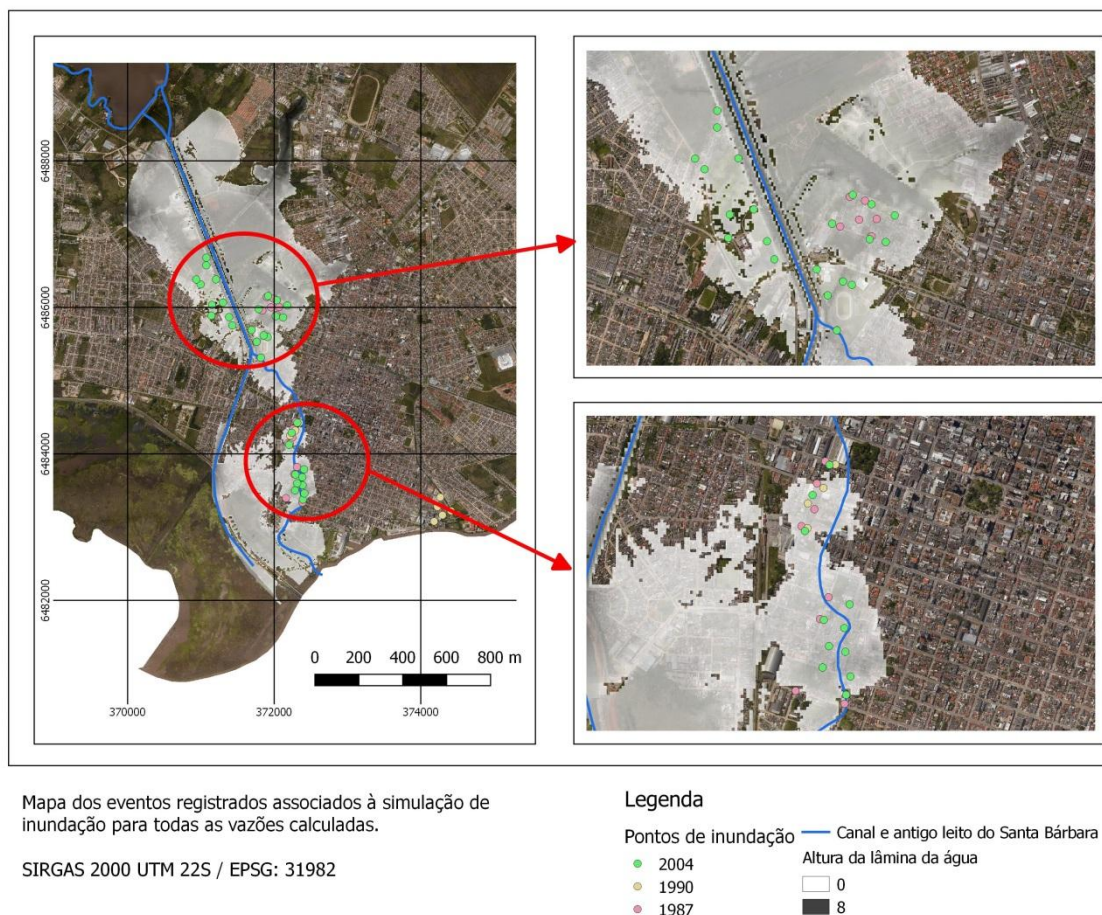


Figura 33 – Simulação de inundação X eventos registrados
Fonte: Autoria própria, 2017.

A Figura 34, do canto inferior direito, demonstra as inundações ocorridas em área nos arredores do antigo leito do Arroio Santa Bárbara. Os pontos mais ao norte do antigo leito estão sobre a área do antigo camelódromo da cidade, o atual Pop Center, e os pontos ao sul terminam sua representação na região do porto da cidade, sendo os últimos dois pontos referentes ao evento de 1987, representados pelas esquinas da Rua Conde de Porto Alegre com as Ruas Santo Dumont e General Osório.

A região indicada no canto superior direito da Figura 34 retrata as inundações na área onde se encontra a rodoviária de Pelotas (lado oeste do canal), para esta região somente são encontrados registros de inundação para o período de 2004.

Com eventos registrados para os eventos ocorridos nos anos de 1987 e 2004, os pontos encontrados ao lado leste do canal estão representados dentro da área da Vila Castilho.

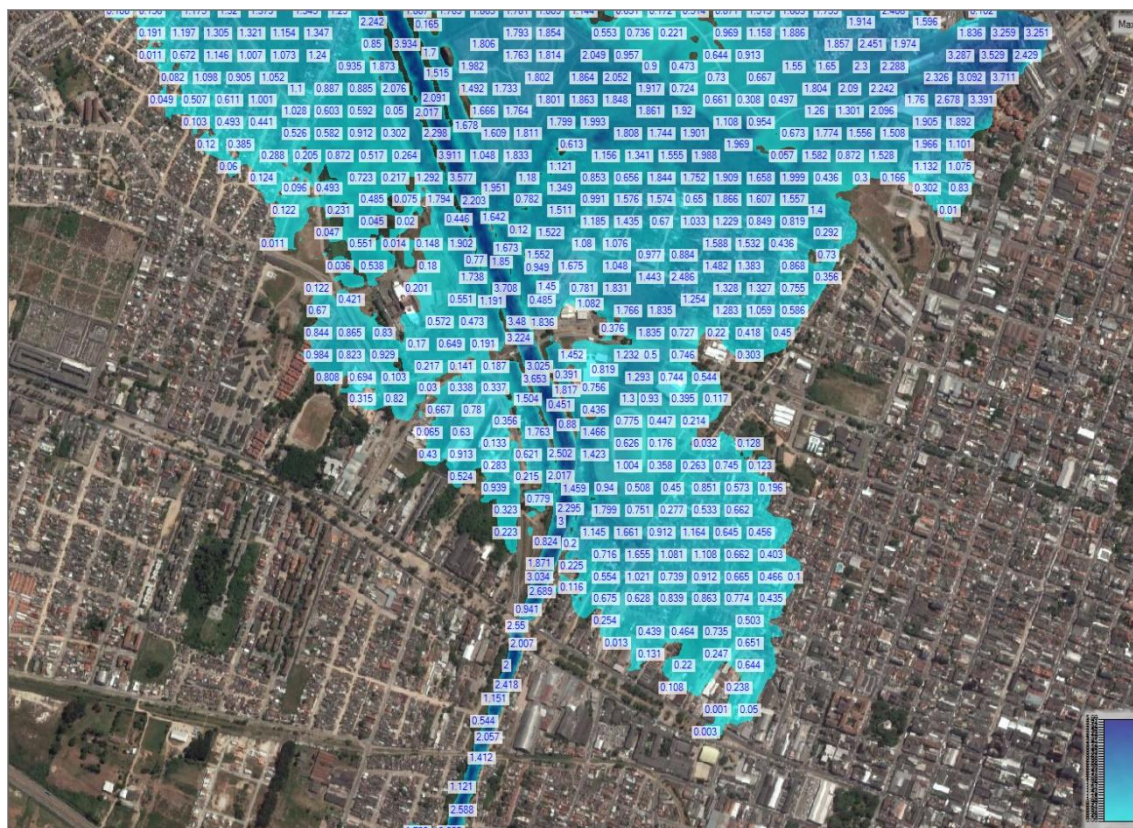


Figura 34 - Alturas da lâmina de água oriundas de simulação a partir de valores de projeto – Detalhe 1.

Fonte: Autoria própria, 2017.

Devido ao fato de o evento simulado ter sido calculado a partir de valores de projeto (Figura 35 e 36), não existe a possibilidade da comparação das alturas da lâmina de água presentes nos locais inundados com dados de eventos acontecidos no passado, não permitindo, assim, a validação do modelo do ponto de vista quantitativo. No entanto, a partir da metodologia de modelagem desenvolvida para o projeto, se cria a possibilidade da verificação da altura da lâmina da água para eventos reais a partir da repetição da simulação com o uso de dados de precipitação de eventos conhecidos.



Figura 35 - Alturas da lâmina de água oriundas de simulação a partir de valores de projeto – Detalhe 2.

Fonte: Autoria própria, 2017.

5 Considerações finais

Com a realização do trabalho foi possível desenvolver uma proposta metodológica para modelagem hidrológica da bacia do Santa Bárbara, permitindo a criação de dados que possibilitem a identificação do comportamento da inundação em algumas das zonas de maior suscetibilidade para inundações na cidade de Pelotas. Os mapas e animações de inundações criados são uma ferramenta de grande utilidade para elaboração de planos de proteção e minimização dos riscos de inundações, logo, através da metodologia proposta, múltiplos cenários de precipitação podem ser utilizados para simulações. A adequabilidade dos mapas gerados pôde ser validada quando feita a comparação da área dos eventos simulados em relação ao registro de pontos de inundação referentes a eventos críticos de inundações ocorridas nos anos de 1987, 1990 e 2004.

A utilização de dados de maior qualidade interfere diretamente na qualidade dos resultados, principalmente no que tange a etapa das simulações do escoamento sobre o terreno trabalhado. Desse modo, os resultados obtidos neste trabalho somente puderam ser concretizados devido à existência e acesso a dados de altimetria de grande qualidade. Verificou-se, porém, que mesmo com posse de dados de altíssima qualidade se faz necessária a verificação de falhas ou formas de representação que possam ocasionar uma falha na real representação do modelo executado.

A partir da metodologia discriminada no trabalho se tornou possível, apesar das dificuldades encontradas, a realização de simulações de inundação na bacia trabalhada, assim como a criação de mapas e animações que demonstram o processo de inundação. Com posse dessas informações, foi possível realizar a avaliação das zonas afetadas que possuem um maior risco.

Os dados criados no presente trabalho são de extremo valor e servem de subsídio aos órgãos públicos responsáveis pelas ações de planejamento e gestão da bacia do Santa Bárbara, permitindo a esses órgãos, em especial a Defesa Civil, o acesso a informações que auxiliem na tomada de decisões no que tange aos problemas oriundos das inundações na bacia.

5.1 Limitações

O principal fator limitante encontrado para a realização do trabalho está relacionado com a área de cobertura e divergência de qualidade dos dados altimétricos possuídos; a falta de valores de altimetria em algumas regiões da bacia e a falta de dados de maior qualidade para a zona rural da bacia são fatores que prejudicam a real representação do modelo desenvolvido para as simulações.

Com a realização do trabalho, foram verificadas uma série de necessidades de levantamento de dados, de forma a possibilitar uma maior fidedignidade à realidade para os futuros trabalhos desenvolvidos na bacia. Tais levantamentos estão principalmente relacionados com parâmetros de construção e estado da barragem, do canal do Santa Bárbara e dos sistemas de drenagem da cidade de Pelotas.

Uma das maiores dificuldades do trabalho foi realizar a propagação da onda na barragem do Santa Bárbara, isso ocorreu pela falta de informações dispostas sobre as suas condições e topografia do local. De acordo com a Política Nacional de Segurança das Barragens, Lei N° 12.334, 2010, dados técnicos referentes às obras de barragens, assim como o seu monitoramento, são considerados vitais para a manutenção das barragens, para tal, sugere-se que as necessárias informações cabíveis a adequada manutenção da barragem do Santa Bárbara sejam coletadas o quanto antes.

Dados referentes ao sistema de drenagem da cidade como a integridade dos trechos do canal, deposição de sedimento e características construtivas seriam igualmente de grande importância para considerações a serem feitas na geração do modelo. De mesma forma, o conhecimento da localização e dos dados de projeto das galerias de drenagem da cidade permitiria um melhor entendimento do problema e possibilitariam a aplicação de uma metodologia mais adequada para a modelagem de inundação nas áreas urbanizadas do município.

5.2 Perspectivas futuras

A integração da rede de drenagem do município seria de fundamental importância para validação do modelo aplicado para as simulações de inundação. Apesar da escassa quantidade de informações possuída pelos órgãos do município,

tal coleta de dados e mapeamento se mostra fundamental para a compreensão dos fenômenos associados aos eventos extremos que acometem, de maneira não rara, Pelotas. Mesmo sabendo das dificuldades existentes para obtenção de tais dados, reforça-se aqui a necessidade de tal levantamento.

A utilização de valores conhecidos de precipitação, oriundos de eventos ocorridos no passado, constitui a possibilidade da validação da metodologia proposta no presente trabalho, do ponto de vista quantitativo. Com esse intuito, propõe-se o desenvolvimento de estudos futuros que tenham como enfoque considerar essas análises.

Testar outras metodologias e *softwares*, assim como aprofundar estudos dos parâmetros hidrológicos e hidráulicos a serem utilizados na modelagem são trabalhos que devem ser realizados no sentido de buscar pelo aperfeiçoamento do resultado das simulações de inundação, produzindo, assim, um melhor resultado para estudos relacionados ao impacto e mitigação dos eventos de precipitação extrema na cidade de Pelotas.

Referências

ALLABYY, A.; ALLABY, M. Koppen Climate Classification. **A Dictionary of Earth Sciences**. 1999.

ALMEIDA, E.R. **Modelagem hidrológica de inundações urbanas baseadas em dados geoespaciais de alta resolução**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geográfica) – Universidade de Lisboa, 2015.

ANEES et al. **Numerical modeling techniques for flood analysis**. Journal of African Earth Sciences. 2016.

BARBOSA, F.A.R. **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape/PB**. 2006. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, João Pessoa, 2006.

BRASIL. Ministério das Cidades. 2006. **Programa Drenagem Urbana Sustentável**. Manual para apresentação de propostas. 23 p.

BUARQUE et al. **Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação**. 2009.

BURROUGH, P.A.; MCDONNEL, R.A. **Principles of Geographical Information Systems: Spatial Information Systems and Geostatistics**. Oxford University Press. Oxford, 333p.

BRUNNER, G.W; CEIWR-HEC. **HEC-RAS River Analysis System 2D Modelling User's Manual Version 5.0**, Fevereiro, 2016.

BRUNNER, G.W; CEIWR-HEC. **HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 5.0**, Fevereiro, 2016.

CANHOLI, A.P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. Oficina de Textos, São Paulo. 304 p. 2005

CASTRO, A.S. **Uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle quali-quantitativo do escoamento superficial urbano**. 2011. 142p. Tese (Doutorado programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, BR-RS.

CECCONELLO, S. T. **Análise ambiental dos processos dinâmicos do uso e cobertura da terra sobre as áreas de preservação permanente no município de pelotas entre os anos de 1985 e 2015**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Territorial e Sistemas Agroindustriais, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.

COSTA, A.H.A. **Simulação dos impactos da urbanização sobre as inundações urbanas na Bacia Hidrográfica do Rio Cuia**. Dissertação (Mestrado em) – Universidade Federal da Paraíba, 2013.

DAMÉ, R.C.F.; TEIXEIRA, C.F.A; MOURA, C; MACHADO, R; BESKOW, S. **Análise do impacto de um evento de precipitação ocorrido na cidade de Pelotas/RS**. Revista de Ciências Agro-Ambientais, Alta Floresta, v.3, p.15-25, 2005.

EM-DAT; Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. **2013 – Disasters in Numbers**. 2014

ENOMOTO, C.F. **Método para elaboração de mapas de inundação**: estudo de caso na bacia do Rio Palmital, Paraná. 2004. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós- Graduação em Recursos Hídricos e Ambientais). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

FLORES, C. A.; FILIPPINI-ALBA, J. M.; WREGE, M. S. **Zoneamento agroclimático do eucalipto para o Estado do Rio Grande do Sul e edafoclimático na região do Corede Sul - RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. 87p. ISBN 978-85-85941-34-5. 2009

GOERL, R.F.; KOBIYAMA, M. Considerações sobre as Inundações no Brasil. XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2005, João Pessoa. **Anais...** Porto Alegre, ABRH, 2005.

GOODELL, C. **The RAS Solution**. Disponível em: <<http://hecrasmodel.blogspot.com.br/2016/03/1d-2d-or-1d2d-how-should-i-build-my.html>>. Acesso em: 15 dez. 2017.

GOULART, J.P.; MAESTRINI, A.P.; NEBEL, A.L. Relação Intensidade-Duração-Frequência das Chuvas em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.7, n.1, p.543-552, 1992.

HANSMANN, Henrique Z. **Descrição e caracterização das principais enchentes e alagamentos de Pelotas-RS**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2013.

HASENAK, H.; WEBER, E. (Org.). **Base Cartográfica Vetorial Contínua do Rio Grande do Sul**. Escala 1:50.000. 1ªed. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia, Laboratório de Geoprocessamento, 2010. 21 p.

HERNANDEZ V. Propagação de Enchentes em Reservatórios – Método Direto. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 12 n.2 Abr/Jun 2017, 115-122. 2007.

IPH. **Plano diretor de drenagem urbana de Porto Alegre** – Manual de drenagem urbana. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 2005.

LIMA, Gustavo Farias. **Avaliação das Áreas de Risco de Inundação no Município de Pelotas, RS**: Uma Proposta Metodológica. Monografia (Graduação em

Engenharia Ambiental e Sanitária) – Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

MATOS, J. **Fundamentos de Informação Geográfica**. 5ªed. Lisboa: Editora LIDEL – Edições técnicas, 2008.

MELLO, C. R. D.; SILVA, A. M. D. **Hidrologia**: princípios e aplicações em sistemas agrícolas. 1ª. ed. Lavras: UFLA, 2013. 455 p. ISBN 9788581280296.

MOTA, S. **Urbanização e meio ambiente**. 4ªed. Rio de Janeiro, 2011.

NEWSON, M. **Land, water and development**: river basin systems and their sustainable management. London: Routledge, 1992.

OLIVEIRA, M.C.B. **A transposição do leito do canal Santa Bárbara, Pelotas/RS**: utilização de SIG na análise temporal de uma alteração de drenagem urbana. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.

PENDER, G., Briefing: introducing the flood risk management research consortium. Proc. Inst. Civ. Eng. - **Water Management**. 159 (1), 3e8. 2006.

Pugatch, V. Imagem Barragem Santa Bárbara em 1982. Disponível em: <<http://mapio.net/pic/p-64830097/>>. Acessada em: nov. 2017.

RASERA, G.;CAMPOS, C.R.J. Análise de um caso de enchente ocorrido na região de pelotas-rs em janeiro de 2009. **Ciência e Natura**, v. 36, p. 52-60, 2014.

RODRIGUES. A.C.B. **Simulação hidrológica de cheias na Bacia do rio Cavaco em Angola**. Dissertação para obtenção de Mestrado em Engenharia e Gestão da Água. 2014.

SILVA, C. S. **Inundações em Pelotas/RS**: o uso de geoprocessamento no planejamento paisagístico e ambiental. 2007. 196f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

SOUZA, C.F.; CRYZ, M.A.S.; TUCCI, C.E.M. Desenvolvimento urbano de baixo impacto: planejamento e tecnologias para a sustentabilidade das águas urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 9-188, abr/jun. 2012.

TENG J.; JAKEMAN A.J.; VAZE J; CROKE B.F.W; DUTTA. D; KIM S. Flood inundation modelling: A review of methods, recente advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling & Software**, v.90, p. 201-216, 2017.

TOMAZ, P. Tempo de concentração. In: TOMAZ, P. **Curso de Manejo de Águas Pluviais**. [S.l.]: [s.n.], 2013. Cap. 3, p. 1-39.

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

TUCCI, C.E.M. Águas urbanas. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/ABRH, 1997. 943 p.

TUCCI, C.E.M.; BERTONI J.C. **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L; BARROS, M.T. **Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH/ Editora da Universidade/UFRGS, 1995. 428 p.

TUCCI, C.E.M; BERTONI, J.C. Águas urbanas. **Estudos avançados**, v.22, n. 63, p. 97-112, 2008.

TUCCI, C.E.M; BERTONI, J.C. **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: ABRH, 2003.

U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Low Impact Development (LID)**: a literature review. Washington D.C., 2000.

UN-ISDR – **United Nations Documents Related to Disaster Reduction**, Volume 2. 2002. 464 p.

ZAKARIA, A.R.M; SYAKIR, N.A.; OMAR, A.K.M., Numerical modeling techniques for flood analysis. **Journal of African Earth Sciences**, 2016.

Apêndices

Apêndice A – Link para acesso aos vídeos das simulações realizadas no trabalho:
<<https://1drv.ms/f/s!AhSos67g-oFsmB7Nf1RloPv0LwN1>>