

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Engenharias
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais
Mestrado em Ciências Ambientais



Dissertação

**Obtenção e Manipulação dos Dados Geoambientais na Bacia Hidrográfica do
Arroio Santa Bárbara**

Arthur Sperotto Peruzzo

Pelotas, 2022

Arthur Sperotto Peruzzo

**Obtenção e Manipulação dos Dados Geoambientais na Bacia Hidrográfica do
Arroio Santa Bárbara**

Dissertação apresentado(a) ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Centro de Engenharias da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

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

Pelotas, 2022

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

P471o Peruzzo, Arthur Sperotto

Obtenção e manipulação dos dados geoambientais na
Bacia Hidrográfica do Arroio Santa Bárbara / Arthur
Sperotto Peruzzo ; Diuliana Leandro, orientadora. —
Pelotas, 2022.

71 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação
em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias,
Universidade Federal de Pelotas, 2022.

1. Inundações urbanas. 2. Gestão de risco. 3.
Batimetria. 4. Planejamento urbano. 5. SIG. I. Leandro,
Diuliana, orient. II. Título.

CDD : 363.7

Arthur Sperotto Peruzzo

Obtenção e Manipulação dos Dados Geoambientais na Bacia Hidrográfica do Arroio
Santa Bárbara

Dissertação Aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em
Ciências Ambientais, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro
de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 25/02/2020

Banca Examinadora:

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

Prof. Dr. Glauber Acunha Gonçalves
Doutor em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná

Prof.^a Dr.^a Suelen Movio Huinca
Doutora em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná

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

RESUMO

PERUZZO, Arthur Sperotto. **Obtenção e Manipulação dos Dados Geoambientais na Bacia Hidrográfica do Arroio Santa Bárbara**. Orientadora: Prof.^a Dr.^a Diuliana Leandro. 2022. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

Eventos de inundação, principalmente quando associados a questões de urbanização desordenada, são problemas com impactos muitas vezes severos e que acometem desde o começo das organizações da sociedade ao desenvolverem as suas cidades à margem de recursos hídricos. A cidade de Pelotas, por ter se desenvolvido muito próxima aos diversos arroios e canais existentes na região, sofre eventualmente com danos oriundos de eventos extremos que envolvem a inundação desses leitos de rios e dos sistemas de drenagem pluvial. A região onde se encontra a Bacia Hidrográfica do Arroio Santa Bárbara (BHASB) é uma das áreas mais afetadas por eventos severos de inundação na cidade de Pelotas. Tendo em vista a dimensão do problema e perdas associadas a esses eventos, o trabalho busca o desenvolvimento de informações que possam ser úteis na gestão de risco para a área de estudo. A integração dos dados já existentes (Defesa Civil e Prefeitura) e dos dados de batimetria, modelagem hidrológica, vulnerabilidade e uso do solo, são alguns dos avanços desenvolvidos para gestão de risco na BHASB. O levantamento batimétrico, realizado durante o período de 29/07/2020 até 01/08/2020, foi a primeira medição realizada do fundo da barragem Santa Bárbara. Com os dados levantados foram aplicadas técnicas de ajustes de dados e interpolação espacial de dados, gerando produtos de modelos digitais do reservatório que foram integrados ao já existente modelo altimétrico da prefeitura de Pelotas. O método de análise multivariada foi aplicado a partir de um modelo de análise de vulnerabilidade (IMAAI), resultando no mapeamento em menor escala de um índice representativo das áreas mais vulneráveis a eventos de inundação urbana, para toda área da BHASB. A partir da obtenção e manipulação de imagens de satélite recentes, foram aplicadas técnicas de classificação de imagens para obtenção de um mapa de uso e ocupação do solo, visando o melhor das características da bacia em relação a eventos de precipitação e escoamento superficial.

Palavras-chave: Inundações urbanas. Gestão de risco. Batimetria. Planejamento urbano. SIG (Sistemas de informações geográficas).

ABSTRACT

PERUZZO, Arthur Sperotto. **Acquisition and Manipulation of Geoenvironmental Data in the Santa Bárbara Stream Watershed.** Orientadora: Prof.^a Dr.^a Diuliana Leandro. 2022. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

Flood events, especially when associated with disorderly urbanization issues, are problems with often severe impacts and that affect society's organizations from the beginning, when they develop their cities on the margins of water resources. The city of Pelotas, as it developed very close to the various streams and canals in the region, eventually suffers from damage from extreme events that involve the flooding of these riverbeds and rainwater drainage systems. The region where the Arroio Santa Bárbara Watershed (BHASB) is located is one of the areas most affected by severe flood events in the city of Pelotas. Bearing in mind the dimension of the problem and losses associated with these events, the work seeks to develop information that may be useful in risk management for the study area. The integration of existing data and data from bathymetry, hydrological modeling, vulnerability and land use are some of the advances developed for risk management at BHASB. The bathymetric survey, carried out during the period from 07/29/2020 to 08/01/2020, was the first measurement carried out from the depths of the Santa Bárbara dam. With the collected data, techniques of data adjustments and spatial interpolation of data were applied, generating products of digital models of the reservoir that were integrated to the already existing altimetric model of the city of Pelotas. The multivariate analysis method was applied from a vulnerability analysis model (IMAAI), resulting in the mapping on a smaller scale of a representative index of the most vulnerable areas to urban flood events, for the entire BHASB area. From the acquisition and manipulation of recent satellite images, image classification techniques were applied to obtain a map of land use and occupation, aiming at the best of the basin's characteristics in relation to precipitation events and surface runoff.

Keywords: Urban floods. Risk management. Bathymetry. Urban planning. GIS (Geographic Information Systems).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de impactos causados por inundações.....	14
Figura 2 - Estrutura KULTURisk para análise de risco à inundações (Adaptado de Giupponi et al., 2014).....	21
Figura 3 - Modelo AHP sintético.....	23
Figura 4 - Modelo AHP proposto por Cai et al., (2019).....	24
Figura 5 – Sub-bacias: HEC-GeoHMS.....	29
Figura 6 - Fluxogramas para o desenvolvimento dos critérios principais.....	31
Figura 7 - Fluxogramas para o desenvolvimento do critério exposição.....	32
Figura 8 - Fluxogramas para o desenvolvimento do MDE.....	33
Figura 9 - Fluxograma para o desenvolvimento do critério susceptibilidade.....	34
Figura 10 - Operação para geração do mapa de susceptibilidade.....	35
Figura 11 - Fluxograma para o desenvolvimento do processo de modelagem hidrológica.....	35
Figura 12 - Fluxograma para o desenvolvimento do processo de modelagem hidrológica.....	36
Figura 13 - Fluxograma para o desenvolvimento do processo de modelagem hidrodinâmica	37
Figura 14 - Imagem CBERS-4 MUX.....	38
Figura 15 - Diagrama metodológico.....	40
Figura 16 - Classificação SVM.....	41
Figura 17 - Etapas para o desenvolvimento de mapas de risco.....	47
Figura 18 - Fluxogramas para o desenvolvimento dos critérios principais.....	48
Figura 19 - Fluxograma para o desenvolvimento do critério exposição.....	49
Figura 20 - Fluxograma para o desenvolvimento do MDE.....	50
Figura 21 - Fluxograma para o desenvolvimento do critério susceptibilidade.....	52
Figura 22 - Operação para geração do mapa de susceptibilidade.....	53
Figura 23 - Fluxograma para o desenvolvimento do processo de modelagem hidrológica.....	54
Figura 24 - Fluxograma para o desenvolvimento do processo de modelagem hidrológica.....	54
Figura 25 - Fluxograma para o desenvolvimento do processo de modelagem hidrodinâmica.....	55
Figura 26 - Mapa de susceptibilidade.....	56
Figura 27 - Modelo Batimétrico do reservatório.....	58
Figura 28 - Mapa de Isobáticas do reservatório.....	60
Figura 29 - Mapa de classificação dos solos.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Revisão de conceitos referentes a avaliação de risco.....	14
Tabela 2 – Escalas para análise par-a-par dos fatores de influência nos critérios.....	23
Tabela 3 – Fatores, classes, pesos e fonte dos dados utilizados para o mapeamento de susceptibilidade na Bacia Hidrográfica do Santa Bárbara (BHSB).....	32
Tabela 4 – Valores de CN para coberturas do solo em meio rural.....	42
Tabela 5 – Valores de CN para coberturas do solo em meio urbanizado.....	43
Tabela 6 – Fatores, classes, pesos e fonte dos dados utilizados para o mapeamento de susceptibilidade na Bacia Hidrográfica do Santa Bárbara (BHSB).....	45
Tabela 7 – Fatores, classes, pesos e fonte dos dados utilizados para o mapeamento de suscetibilidade na Bacia Hidrográfica do Santa Bárbara (BHSB).....	51
Tabela 8 – Matriz de confusão SVM.....	62
Tabela 9 – Matriz de confusão NN.....	62
Tabela 10 – Acurácia e Coeficiente Kappa obtidos na classificação de imagens.....	63

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AHP – Analytical Hierarchical Process

PPGAmb – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

BHSB – Bacia Hidrográfica do Santa Bárbara

CN – Curva Número

RS – Rio Grande do Sul

IDF – Intensidade-Duração-Frequência

APP – Área de Preservação Permanente

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDT – Modelo Digital de Terreno

MUB – Mapa Urbano Básico

IMAAI – Instrumento para o Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Alagamentos e Inundações Urbanas

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

UNISDR – Estratégia Internacional das Nações Unidas para a Redução de Desastres

2D - Bidimensional

3D - Tridimensional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	Objetivo geral.....	10
1.2	Objetivos específicos.....	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Inundações urbanas	11
2.2	Tipos de impacto e conceitos de gestão de risco	13
2.3	Avaliação de risco e medidas mitigadoras.....	19
2.4	Análise multicritério	22
2.5	SIG e modelagem	24
3	MÉTODO	Erro! Indicador não definido.
3.1	Aspectos gerais da área de estudo.....	28
3.2	Modelagem hidrológica.....	28
3.3	Batimetria da barragem	31
3.4	Uso do solo	39
3.5	IMAAI	44
4	RESULTADOS.....	46
4.1	Proposta metodológica para mapeamento de risco.....	46
4.1.1	Exposição.....	49
4.1.2	Vulnerabilidade.....	49
4.1.3	Perigosidade (hazard)	53
4.2	Mapeamento de risco da Bacia Hidrográfica do Santa Bárbara: panorama em pequena escala	55
4.3	Batimetria da barragem	57
4.4	Classificação do uso de solo	61
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	66
	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

A falta de controle do avanço da urbanização promove o desequilíbrio dos meios urbanos afetando aspectos diversos como as condições e uso do solo, impermeabilização, modificação de paisagens e poluição ambiental. Dentro do ciclo hidrológico, o avanço do meio urbano sobre áreas naturalmente não modificadas, e de forma desenfreada, causa impactos diretos relativos à capacidade de infiltração de água nos solos e na forma como ela é escoada, através da modificação das linhas naturais de drenagem e do aumento da vazão de pico das bacias hidrográficas, favorecendo a ocorrência de inundações e alagamentos.

Fatores como projetos e obras de infraestrutura de drenagem urbana ineficazes, e disposição inadequada de resíduos sólidos se somam ao desenvolvimento urbano descontrolado, contribuindo diretamente para o aumento da intensidade e frequência de eventos de inundação e alagamento, causando uma série de impactos negativos nos sistemas de organização social, saúde, econômicos e sociais das cidades.

Dentro da gestão de risco e planejamento urbano, os mapas de inundação e mapeamento de áreas de risco, com relação a eventos de inundação, são ferramentas de grande aporte estratégico para elaboração de projetos e para tomadas de decisão referentes aos mais diversos problemas que são desencadeados a partir da ocorrência de eventos extremos. A partir da elaboração desse tipo de estudo é possível verificar espacialmente os pontos de maior fragilidade, bem como áreas de ocupação com maior risco, uma vez que tais informações auxiliam diretamente para tomada de medidas referentes à previsão e prevenção de riscos, possibilitando, ainda, atuar na remediação de desastres ocorridos, determinando de forma lógica e rápida quais as melhores rotas para a população evacuar de forma segura uma área atingida.

Para elaborar mapas de inundação e risco representativos de diferentes cenários de eventos extremos (propostas de modificação do terreno com medidas mitigatórias, graus de urbanização e eventos climáticos), se faz necessária uma série de informações relativas ao terreno (ocupação e demais características morfológicas), assim como as séries históricas como ponto de partida para representação dos eventos de hidrológicos.

A região onde se encontra a Bacia Hidrográfica do Arroio Santa Bárbara (BHASB) é uma das áreas mais afetadas por eventos severos de inundação na cidade de Pelotas (SILVA, 2007). Tendo em vista a dimensão do problema e perdas associadas a esses eventos, o trabalho busca o desenvolvimento de informações que possam ser úteis na gestão de risco para a área de estudo. A integração dos dados já existentes (Defesa Civil e Prefeitura) e dos dados de batimetria, modelagem hidrológica, vulnerabilidade e uso do solo, são alguns dos avanços desenvolvidos para gestão de risco na BHASB. Os produtos do trabalho servirão como base de dados para mais estudos, que podem abordar, além da temática das inundações, questões como transporte de sedimentos e qualidade da água.

1.1 Objetivo geral:

Obter e manipular dados necessários para modelos de avaliação de risco a inundações na Bacia Hidrográfica do Arroio Santa Bárbara.

1.2 Objetivos específicos:

- Propor metodologia para avaliação de risco a inundações;
- Realizar mapeamento batimétrico da área de barragem;
- Criar informações sobre uso e ocupação do solo com base em classificação de imagens obtidas de satélites recentes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Inundações urbanas

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

As inundações nas zonas urbanas ocorrem desde as primeiras civilizações que se estabeleceram à margem de recursos hídricos. Elas acontecem quando 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 estão a habitar este 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 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*); e as inundações bruscas, que 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 conhecido como enxurrada e, na língua inglesa, esse tipo de inundação se chama *flash flood*) (GOERL; KOBAYAMA, 2005).

De acordo com classificação feita por Viglione e Rogger (2014), as inundações podem ser diferenciadas de acordo com a forma dos seus processos geradores e a partir da fonte de água que provoca a inundação. Os autores citam vários tipos de

inundação: *river flood, flash flood, dam-break floods, ice-jam floods, glacial-lake floods, urban floods, coastal floods, and hurricane-related floods.*

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 impactadas e de casos de óbitos (EM-DAT, 2014; TOMINAGA et al., 2009).

As mudanças climáticas e o aumento da urbanização acarretam um grande desafio para a gestão e planejamento dos meios urbanos (BERTILSON, 2018). Estudos recentes demonstram que as mudanças climáticas tendem a encaminhar uma série de mudanças nos padrões dos comportamentos do ciclo hidrológico para as diversas regiões do planeta, causando um grande aumento na probabilidade da ocorrência de eventos extremos como as inundações (BATES, 2018). Os processos de urbanização acelerada resultam em uma modificação radical de um sistema ecológico equilibrado para um sistema de relações complexas e predominantemente não lineares. A relação de causa e efeito entre o aumento da degradação ambiental e o crescimento populacional é função de muitos aspectos, que podem ocasionar situações de calamidades como, por exemplo, eventos de inundações urbanas.

Outro agravante do potencial causador dos impactos oriundos dos eventos extremos são as ocupações inadequadas de áreas de risco. Por exemplo, as construções de habitações em zonas de várzea acontecem desde o começo da história das sociedades humanas, sendo essenciais para a sua locomoção e desenvolvimento, muitas razões como o comércio e agricultura justificam esse comportamento. Ao longo do seu processo de formação, muitas dessas ocupações das planícies de inundação se utilizaram de medidas protetivas como diques e barragens, com efeito de diminuir significativamente a frequência dos eventos de inundação nessas áreas. Por outro lado, devido ao aumento de resistência do sistema criado pelas medidas de proteção, toda vez que um evento supera esse grau de resistência, ele também supera em magnitude os efeitos adversos, ocasionando, muitas vezes, perdas significativas nos meios urbanos e rurais (SCHROEDER et al., 2016).

A avaliação e a gestão do risco de inundações devem incluir leituras de diversas esferas do conhecimento pelo fato de as ciências da terra não serem competentes para reduzir os seus impactos sem a contribuição das ciências sociais, e vice-versa,

sendo a problemática das inundações marcada fortemente pela intervenção humana, requerendo respostas a diversos níveis e escalas espaciais e temporais (MERZ et al., 2010).

2.2 Tipos de impacto e conceitos de gestão de risco

De acordo com Hammond et al. (2015), os impactos causados pelas inundações são tipicamente classificados em dois critérios:

- a) Impacto tangível ou intangível – o critério estabelecido para essa classificação é relativo à capacidade de um impacto ser quantificado em termos monetários. Logo, um impacto tangível é aquele que é prontamente valorado economicamente, são exemplos desse tipo de impacto os danos a estruturas e as perdas nos serviços públicos. De forma contrastante, os impactos intangíveis causam uma grande dificuldade para a realização de uma quantificação dado ao caráter altamente subjetivo da atribuição de valor a impactos como perdas de vida e contaminação ambiental.
- b) Impacto direto ou indireto – classificação feita frente ao espaço de tempo demorado entre o contato da onda de inundação até o surgimento do impacto. Os impactos diretos ocorrem a partir do contato físico imediato entre as unidades e estruturas do ambiente impactado. Os danos indiretos são aqueles que, induzidos por um impacto direto, geram uma perda econômica e/ou ambiental. Essas perdas podem ser exatamente sobre a área acometida diretamente, mas podem se estender ao longo de outras áreas, sistemas e meios físicos.

Os impactos totais relacionados com eventos extremos podem ser representados na forma de uma matriz total de custo, que leva em consideração todos os impactos classificados como diretos, indiretos, tangíveis e intangíveis relacionados com dado evento. A Figura 1, abaixo, é uma representação da matriz total de custo baseada em elementos de impacto representativos das quatro classes descritas.



Figura 1 – Exemplos de impactos causados por inundações.

Com a finalidade de construir uma base sólida conceitual sobre as ferramentas utilizadas na gestão de riscos de inundações, o projeto KULTURisk (www.kulturisk.eu/) desenvolveu a Tabela 1 (GIUPPONI, 2014; FIELD et al., 2012; UNISDR, 2009):

Tabela 1 – Revisão de conceitos referentes à avaliação de risco.

	KULTURisk	Field et al., 2012 UNISDR (2009)
<i>Adaptive capacity</i> Capacidade de adaptação	Field et al., 2012	<i>IPCC</i> : A combinação de forças, atributos e recursos disponíveis para um indivíduo, comunidade, sociedade ou organização e que pode ser usado para preparar e empreender ações para redução de impactos adversos, moderar danos ou se aproveitar de situações benéficas. <i>UNISDR</i> : N/A
<i>Attenuation</i>	Considera uma estrutura de barreira estrutural construída	N/A

Atenuação	para o perigo, e que pode afetar a exposição.	
<i>Coping capacity</i> Capacidade de lidar	Field et al., 2012	<i>IPCC</i>: A habilidade das pessoas, organizações e sistemas para endereçar, manejar e sobrepor situações adversas usando as habilidades, recursos e oportunidades disponíveis, <i>UNISDR</i>: A habilidade de pessoas, organizações e sistemas de encarar e manejar condições adversas, emergências ou desastres através das suas habilidades e recursos disponíveis.
<i>Direct costs</i> Custos diretos	São os custos devido aos danos provocados pelo perigo e que ocorrem durante o evento físico (MERZ et al., 2010).	N/A
<i>Exposure</i> Exposição	Field et al., 2012	<i>IPCC</i>: A presença de pessoas; meios de subsistência; serviços e recursos ambientais; infraestrutura; ou de ativos econômicos, sociais ou culturais presentes nos locais adversamente afetados. <i>UNISDR</i>: Pessoas, propriedades, sistemas, ou outros elementos presentes em zonas de perigo que estão, desse modo, sujeitas a perdas potenciais.
<i>Hazard</i> Perigo	Field et al., 2012	<i>IPCC</i> : É a potencial ocorrência de um evento físico natural ou tecnológico que pode causar perdas de vida, ferimentos, ou outros impactos à saúde, assim como danos e perdas para

		propriedades, infraestrutura, meios de subsistência, fornecimento de serviços e recursos ambientais. <i>UNISDR</i>: Um fenômeno perigoso, matéria, atividade humana ou condição que pode causar perdas de vida, ferimentos, ou outros impactos à saúde, danos em propriedades, perdas de meios de subsistência e serviços, perturbações sociais e econômicas, ou degradação ambiental.
<i>Indirect costs</i> Custos indiretos	Aqueles induzidos pelo perigo, mas que ocorrem em espaço e tempo fora do evento físico (MERZ et al., 2010).	N/A
<i>Intangible costs</i> Custos intangíveis	Valores perdidos devidos ao desastre, que não podem ou são muito dificilmente transmitidos na forma monetária, por serem valores não associados ao mercado (MERZ et al., 2010).	N/A
<i>Pathway</i> Caminho (meio)	Características geomorfológicas da região a ser avaliada, que afetam a forma como os perigos se propagam e causam a exposição (ex: modelos digitais de elevação). Inclui as barreiras naturais do perigo.	N/A
<i>Potential consequences</i> Consequências potenciais	São expressas na forma de uma matriz de custo total.	N/A
<i>Receptor</i> Receptor	Uma entidade física, com extensão geográfica específica, e que é	N/A

	caracterizada por aspectos particulares como seres humanos, áreas protegidas, cidades, ecossistemas, etc.)	
<i>Resilience</i> Resiliência	Não aplicado à metodologia, mas pode ser definido como o oposto da vulnerabilidade.	<i>IPCC</i>: Habilidade de um sistema e das suas partes componentes de antecipar, absorver, se acomodar ou se recuperar dos efeitos de um evento perigoso de maneira oportuna e eficiente, através da garantia da preservação, restauração e melhoria de suas funções estruturais básicas. <i>UNISDR</i>: Habilidade de um sistema, comunidade ou sociedade exposto a um perigo, de resistir, absorver, se acomodar ou se recuperar dos efeitos de um evento perigoso de maneira oportuna e eficiente, através da preservação, restauração, e melhoria de suas funções estruturais básicas.
<i>Risk</i> Risco	É a combinação da probabilidade de um certo perigo ocorrer e das suas consequências.	<i>IPCC</i>: A probabilidade, dado um período de tempo, de acontecimento de alterações severas no funcionamento normal de uma comunidade ou sociedade em função da interação de um evento físico perigoso com condições sociais vulneráveis, acarretando efeitos adversos humanos, materiais, econômicos, ou efeitos ambientais que requerem emergência imediata por serem responsáveis de satisfazer as necessidades humanas mais críticas e que podem necessitar de um suporte externo para sua recuperação.

		<i>UNISDR</i> : Combinação da probabilidade de um evento e das suas consequências negativas.
<i>Risk perception/awareness</i> Percepção de risco/consciência	A visão global do risco, percebida por uma pessoa ou grupo, incluindo sentimento, julgamento e cultura (ARMONIA PROJECT, 2007).	<i>IPCC</i> : N/A <i>UNISDR</i> : A extensão do conhecimento comum sobre os riscos dos desastres, dos fatores que desencadeiam os desastres e das ações que podem ser realizadas individualmente e coletivamente para reduzir a exposição e a susceptibilidade aos perigos, aumentando a capacidade de adaptação.
<i>Susceptibility</i> Susceptibilidade	A susceptibilidade traz uma avaliação física/ambiental dos receptores, i.e., a probabilidade na qual os receptores podem ser potencialmente afetados por algum perigo, dado os seus fatores estruturais, tipologia do terreno e suas características (em termos físicos e monetários).	N/A
<i>Tangible costs</i> Custos tangíveis	São os custos que podem ser facilmente especificados em termos monetários, pois se referem a ativos que são trocáveis no mercado (MERZ et al., 2010).	N/A
<i>Value factor</i> Fator de valor	Valores sociais, econômicos e ambientais dos receptores expostos.	N/A
<i>Vulnerability</i> Vulnerabilidade	É a combinação da susceptibilidade e das capacidades sociais que determinam a propensão ou predisposição de uma comunidade, sistema, ou ativo a ser adversamente afetado por um perigo específico.	<i>IPCC</i> : A propensão ou predisposição de ser adversamente afetado. <i>UNISDR</i> : As características e circunstâncias de uma comunidade, sistema ou ativo que o torna susceptível aos efeitos danosos ou um perigo.

2.3 Avaliação de risco e medidas mitigadoras

Uma série de documentos, como o Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais e a Diretiva Europeia sobre Inundações (2007/60/EC), requerem o desenvolvimento de mapas de risco que demonstrem o potencial das consequências adversas ocasionadas por tais eventos sob o aspecto de diferentes cenários. Esses mapas, em conjunto com o resultado de análises e avaliações econômicas e ambientais, são instrumentos de subsídio para ações de planejamento e tomada de decisões. Para que tais ações possam ser realizadas de forma concisa e coerente, se faz necessário o desenvolvimento de ferramentas e métodos de avaliação dos impactos ambientais que, de forma integrada e abrangente, permitam às autoridades uma tomada de decisão frente ao risco eminente que é decorrido de eventos extremos de inundação.

A mitigação do risco constitui uma das esferas de atuação à disposição das políticas de gestão do risco situada na interface entre os dois prismas maiores, segundo os quais são vistas as perspectivas da gestão: o foco tecnológico e o foco social (TAVARES; SANTOS, 2014).

De acordo com Hamnett (2000), a mitigação de perigos naturais consiste na tomada de ações que visam reduzir ou eliminar o risco para pessoas e bens numa escala temporal de longo prazo. Ao focar o âmbito das ações sobre o risco, o conceito exposto abrange as ações que visam não apenas a redução do perigo, mas também da vulnerabilidade e dos elementos expostos (YANNOPOULOS, 2013). Esta constatação é de todo relevante porque significa que a mitigação não atua somente sobre o processo de perigo. Por fim, os autores referem que as ações podem ser de natureza estrutural ou não-estrutural.

Das várias definições de mitigação enunciadas, todas enfatizam o objetivo de minimizar ou limitar as consequências adversas relacionadas com a ocorrência de um dado processo de perigo (UNISDR, 2009). As medidas de mitigação são por natureza medidas tomadas em avanço, de forma previa à ocorrência dos processos de perigo. As medidas não estruturais são as que apresentam um leque mais diversificado de soluções, podendo consistir em educação e sensibilização, sistemas de aviso, fundos financeiros de compensação, sistemas de seguros e resseguros, e sistemas de decisão partilhada entre partes interessadas (YANNOPOULOS 2013). No campo das respostas sociais e institucionais ao risco de inundação na União Europeia, países

como o Reino Unido, a França, a Holanda e a Alemanha já percorreram um caminho de conhecimento adquirido pela experiência que poderá ser útil no contexto da elaboração do estudo presente e como referência geral para outros estudos no Brasil. Alguns exemplos são os projetos KULTURisk (<http://www.kulturisk.eu>), STAR-FLOOD (<http://www.starflood.eu>) e FLOODsite (<http://www.floodsite.net>). O *framework* do projeto KULTURisk, proposto para identificação das principais fontes de dados utilizados para quantificação do risco associado à cada classe, é ilustrado na Figura 2, a seguir (GIUPPONI et al., 2014). O modelo que tem como base a representação do risco à função matemática, proposta por Crichton (1999) (Equação 1), propõe a visualização do risco como uma função de três variáveis: perigo (H), vulnerabilidade (V) e exposição (E).

$$R = f(H, V, E) \quad (1)$$

Essa função posteriormente é dividida em outros critérios de avaliação, com dados de entrada (critérios) advindos das mais diversas áreas do conhecimento (ciências ambientais, ciências sociais, cartografia, valores econômicos).

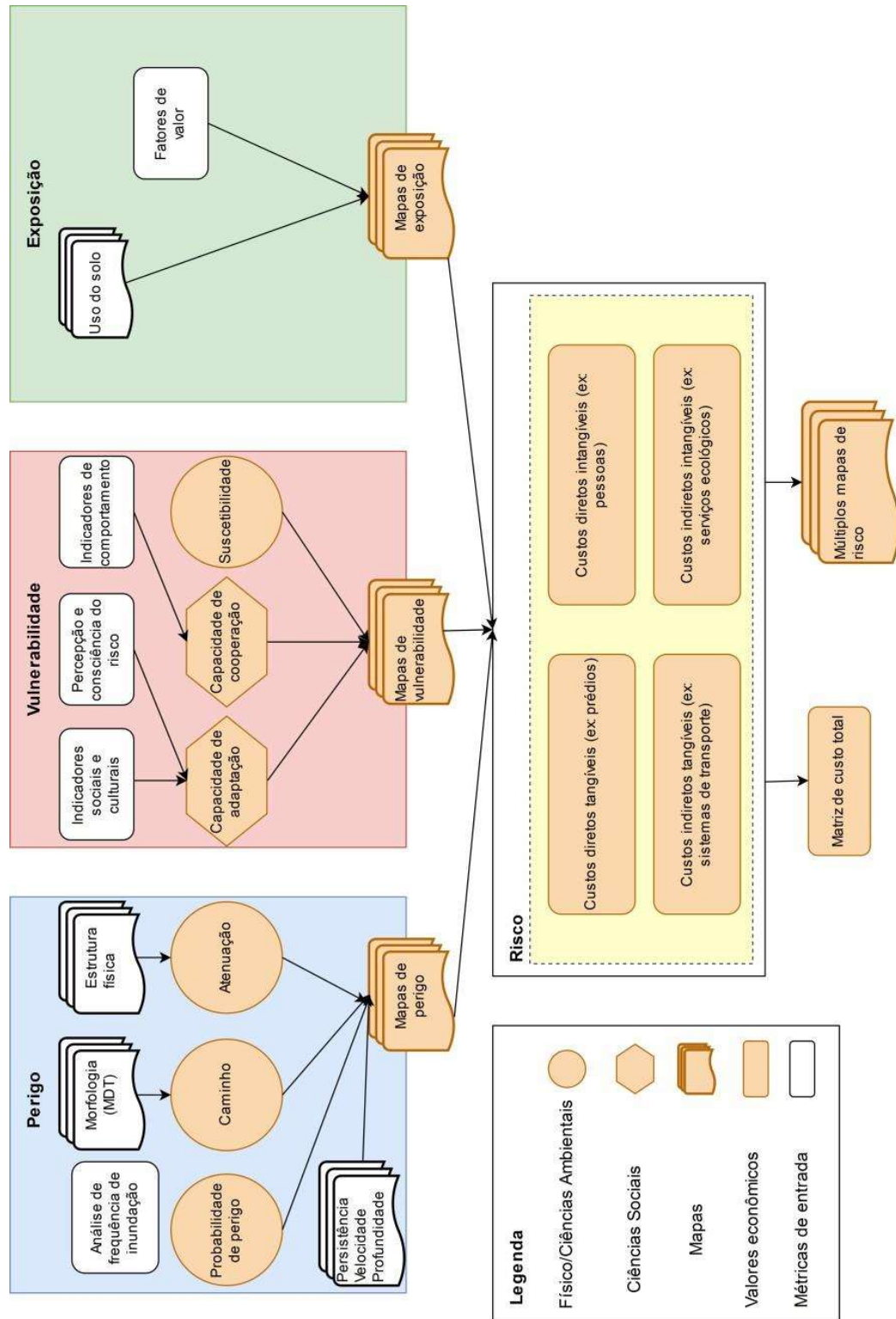


Figura 2 - Estrutura KULTURisk para análise de risco a inundações (Adaptado de GIUPPONI et al., 2014).

2.4 Análise multicritério

A utilização de análise multicritério apresenta-se como uma alternativa viável para a tomada de decisão, pois não existem decisões que sejam exatas sob os critérios analisados, devendo, portanto, que cada pesquisador escolha a melhor alternativa possível (BRIOSO; MUSETTI, 2016). A análise multicritério basicamente é um conjunto de métodos matemáticos que possibilitam a comparação entre alternativas divergentes através de múltiplos critérios (CHAKHAR; MOUSSEAU, 2008) e que visa trazer ao processo de tomada de decisão, racionalidade, baseada em critérios objetivos para o julgamento das alternativas existentes, para obter a resposta ao problema inicial (MOREIRA; CÂMARA; ALMEIDA FILHO, 2001).

No contexto desta pesquisa, a análise multicritério utilizada pelo projeto KULTURisk é o método Analytic Hierarchy Process (AHP) (SAATY, 2005; 2008) que consiste em uma metodologia de medição baseada em comparações par a par, que se baseia em um julgamento para derivação de escalas de prioridade. Durante a implementação do AHP, são construídas hierarquias e, em seguida, são feitos julgamentos ou são realizadas medições em pares de elementos com relação a um critério, para derivar escalas de preferência, que são então sintetizadas em toda a estrutura para selecionar a alternativa preferida (SHAPIRO; KOISSI, 2017).

Uma das áreas onde o AHP encontra aplicação é nas fases subjetivas da avaliação de risco. Dependendo do contexto de tomada de decisão, entretanto, os problemas podem surgir porque a tomada de decisões é frequentemente prejudicada por limitações de dados e ambiguidades, como dados incompletos ou não confiáveis, e informações vagas e subjetivas devido à confiança em especialistas humanos e sua comunicação de variáveis (CAI et al., 2019).

A estrutura sintética da AHP é demonstrada na Figura 3. A partir do uso de uma estrutura hierárquica, que tem como meta atingir um objetivo, são propostos os critérios primários representativos da meta que variam em número conforme a arquitetura proposta para o problema. Para cada critério são propostos os fatores de influência, após, estes são analisados de forma pareada para avaliação da prevalência de um sobre o outro, conforme os índices propostos por Saaty (2005), demonstrados na Tabela 2.

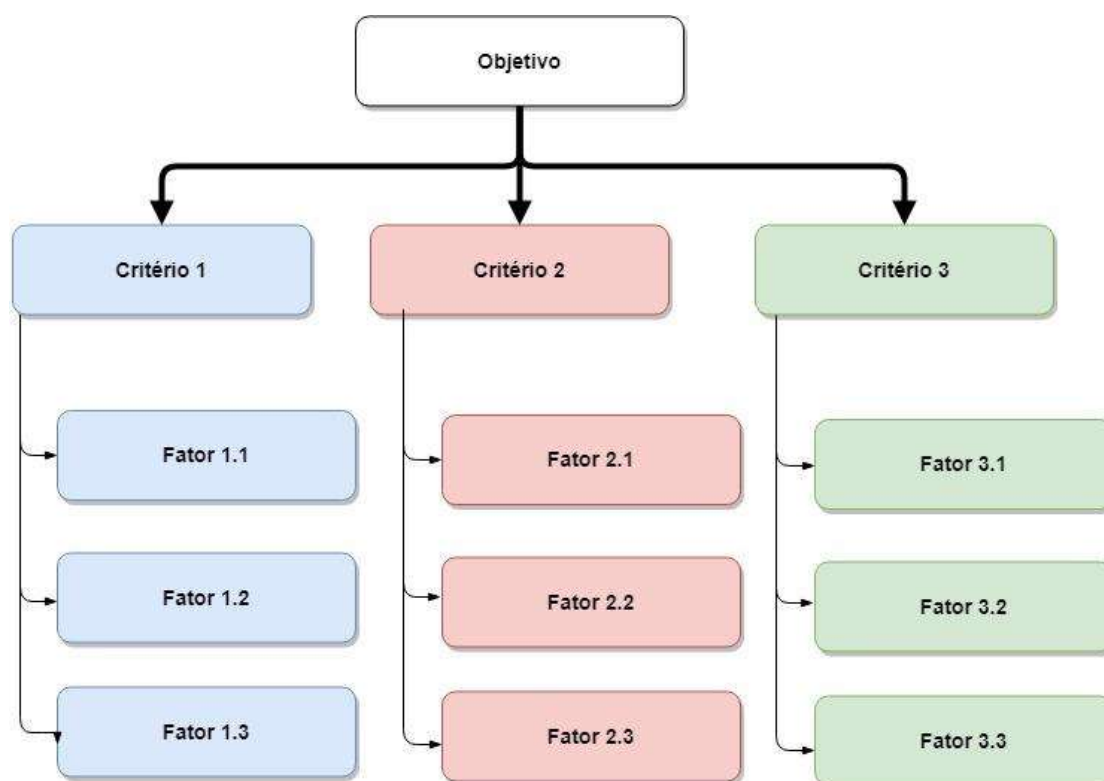


Figura 3 - Modelo AHP sintético.

Tabela 2 – Escalas para análise par a par dos fatores de influência nos critérios.

Intensidade da importância em uma escala absoluta	Definição	Explicação
1	Mesma importância	Duas atividades contribuem de forma igual para o objetivo
3	Importância moderada de um sobre o outro	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra
5	Importância forte ou essencial	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida e a sua dominância é demonstrada na prática
9	Extrema importância	A evidência favorecendo uma atividade em relação a outra se encontra na maior ordem de afirmação possível

Em função da variação da qualidade e da disponibilidade de dados existentes, muitas vezes, para que se possa aplicar o método AHP em estudos como a avaliação

de risco, informações precisam ser manipuladas ou até totalmente criadas. Alguns dos critérios utilizados para montar uma matriz AHP, proposta por Cai et al. (2019), são mostrados na Figura 4, abaixo:

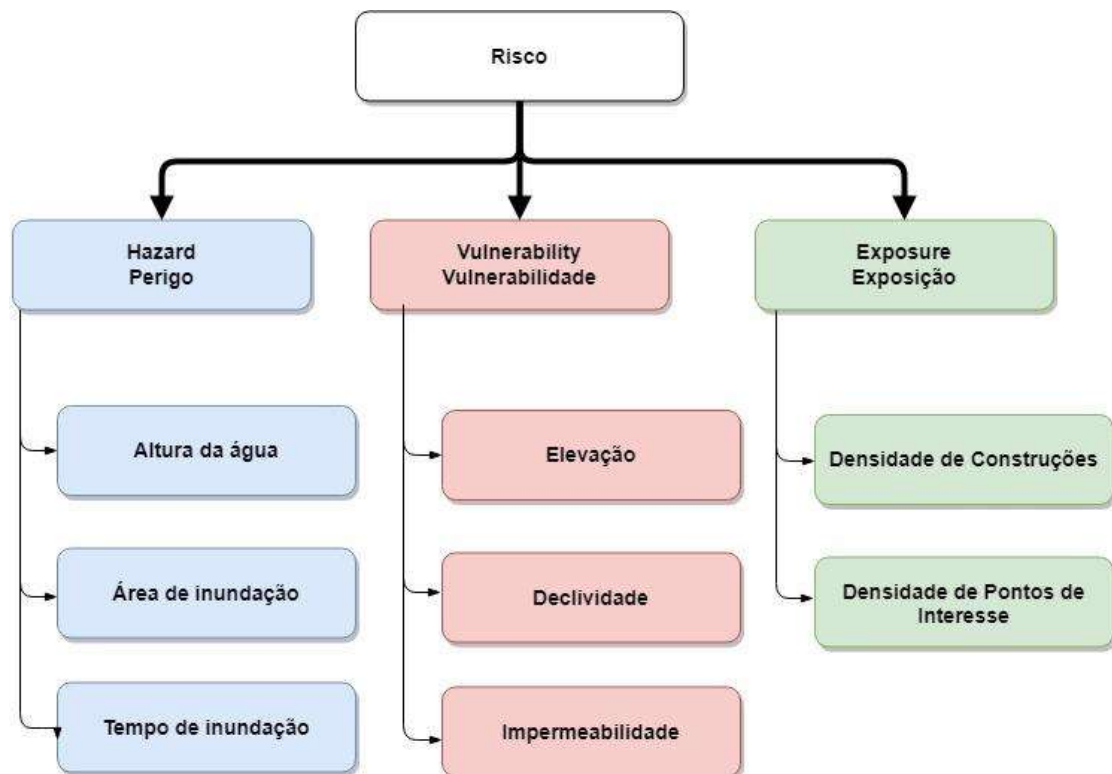


Figura 4 - Modelo AHP proposto por Cai et al., (2019).

2.5 SIG e modelagem

Devido ao grande impacto para a sociedade, criado pelo acontecimento de eventos de inundação, 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, sendo que um dos métodos mais utilizados, recentemente, é o dos modelos de simulação (TENG et al., 2017).

O desenvolvimento e o aprimoramento dos 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 (BUARQUE et al., 2009). De acordo com Almeida (2015), os SIG são hoje uma tecnologia que se torna indispensável para a modelagem de inundações, uma vez que permite 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 dos SIG, dados topográficos podem ser manipulados sob a forma de um Modelo Digital do Terreno (MDT) ou Modelo Digital de Elevação (MDE), modelos onde a representação é feita mais comumente através de uma matriz ou uma imagem no formato *raster*, onde cada elemento ou pixel tem como atributo o valor de elevação do terreno em relação a um determinado referencial. A análise topográfica realizada utilizando estes modelos pode ser conduzida de forma que permita a visualização do comportamento de uma bacia hidrográfica frente a determinada precipitação, criando um modelo onde se possa visualizar o efeito de inundações nesta bacia (BUARQUE et. al., 2009).

Segundo Rodrigues (2014), o MDT e o MDE podem ser utilizados para realização de várias operações, como o cálculo de volumes, análise de perfis de seções transversais, a geração e mapas de declividade, exposição e drenagem, ou seja, todas as operações que são essenciais para o planejamento, ordenamento, elaboração e implantação de projetos.

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, e constituem um material de extrema importância para decisões técnicas, possibilitando uma melhor visualização do sistema de drenagem e o seu comportamento frente a diferentes cenários de inundações (ANEES et al., 2016).

As técnicas de avaliação de impactos e risco se encontram em um estado suficientemente avançado, permitindo a realização de simulações em modelos hidráulicos precisos e de rápida execução. Os modelos hidráulicos existentes envolvem desde funções simplificadas de análise do escoamento superficial unidimensionais (1D), até métodos numéricos mais complexos, envolvendo equações bidimensionais (2D), tridimensionais (3D), e a métodos compostos como as simulações 2D+1D, onde as dimensões de modelo geométrico de terreno (2D) é

combinada a sistemas de microdrenagem (1D). Os modelos hidráulicos são capazes de produzir mapas e animações de eventos de inundação sobre a profundidade e velocidade de escoamento, assim como podem auxiliar na modelagem da concentração de poluentes (TENG et al., 2017).

3 METODOLOGIA

De acordo com Gil (2010), a pesquisa pode ser classificada conforme quatro principais critérios de classificação: a área do conhecimento, a finalidade, o nível de explicação e os métodos adotados.

Conforme a Tabela de Classificação das Áreas do Conhecimento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), esta dissertação se enquadra na área 9 Multidisciplinar: 90500008 - Ciências Ambientais (CAPES, 2017).

De acordo com Marconi e Lakatos (2007), a pesquisa aplicada caracteriza-se por seu interesse prático, visando à utilização ou aplicação dos resultados para resolver problemas concretos. Moreira e Caleffe (2008) e Gil (2010) complementam mencionando que a pesquisa aplicada é voltada à aquisição de conhecimentos de uma situação específica, com o propósito de resolver o problema por meio do desenvolvimento de um novo processo ou produto.

Quanto à finalidade, esta dissertação pode se enquadrar como pesquisa aplicada, dada a proposta do uso integrado de métodos de modelagem, SIG e análise multicritério para a produção do mapeamento das características físicas da BHASB.

Com relação aos objetivos, a pesquisa realizada para a elaboração da dissertação pode ser classificada como explicativa, no entanto precedida pela pesquisa exploratória, a qual, segundo Moreira e Caleffe (2008) e Gil (2010), visa desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, proporcionando maior familiaridade com determinado problema.

Durante a etapa exploratória, foram buscados livros e artigos de periódicos que auxiliaram na escolha de métodos e critérios a serem utilizados no trabalho. A ideia foi usar uma técnica de busca inspirada em revisão sistemática de literatura, realizando uma pesquisa sistematizada a partir de *strings* de busca próprios ao tema da pesquisa e que se adaptavam à situação da BHASB. Já a pesquisa explicativa teve como propósito central identificar os fatores que determinam, ou contribuem de alguma forma, para a ocorrência de determinado fenômeno (GIL, 2010).

Quanto à forma de abordagem do problema, o presente estudo adotou enfoque quantitativo, visto que buscou simular eventos hidrológicos e avaliar diferenças de reação do meio físico frente a esses cenários de inundação, verificando a influência

de fatores como o desenvolvimento urbano desordenado frente a diferentes intensidades de eventos extremos, usando, para tal, bases de dados espaciais e de séries históricas expressas em quantificações numéricas.

Por fim, segundo o método empregado na pesquisa, esta deve ser classificada como experimental, pois consiste na determinação de um objeto de estudo, na seleção das variáveis de influência e na definição das formas de controle e de observação dos efeitos que estas produzem sobre o objeto (GIL, 2010).

3.1 Aspectos gerais da área de estudo

A área de estudo do trabalho é a Bacia do Arroio Santa Bárbara, uma das menores bacias do município de Pelotas (PERUZZO, 2017). Segundo o autor, é uma bacia urbanizada com uma área total de 83 km² e que possui uma altitude variada de 0 a 125 m. 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).

Destaca-se, na área de estudo, 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.

3.2 Modelagem hidrológica

A determinação da área da Bacia Hidrológica do Arroio Santa Bárbara (BHASB) foi feita com auxílio do ArcMap e da extensão HEC-GeoHMS. O MDE utilizado foi um dado de satélite SRTM 30 m, com a extensão reduzida, englobando a área já conhecida da bacia hidrográfica, a partir de verificação feita com o arquivo da ANA de Bacias Hidrográficas codificadas (ANA, 2021). A seguir, na Figura 5, podem ser vistas, em vermelho, as sub-bacias determinadas pela análise acima descrita, e, em verde, as sub-bacias pré-determinadas pelo modelo de codificação da ANA.

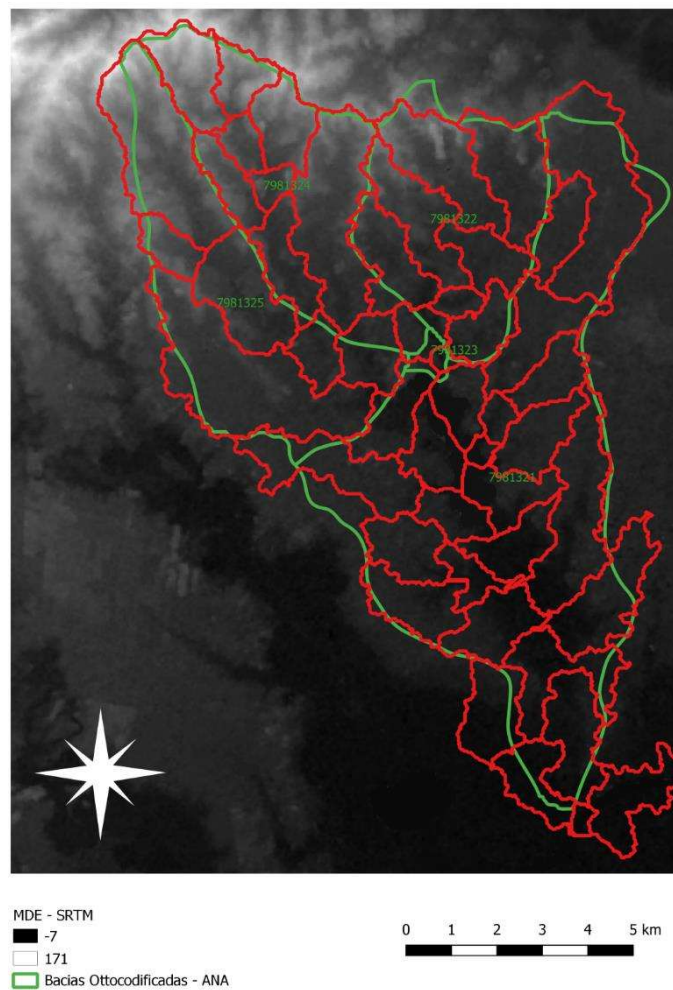


Figura 5 - Sub-bacias: HEC-GeoHMS.

Para a modelagem hidrológica, adotou-se somente o escoamento superficial como variável contribuinte para o balanço hídrico do sistema pelo fato de o trabalho analisar o comportamento das bacias frente a eventos de precipitação de grande magnitude em espaços de tempo curto.

Uma característica importante da Bacia do Arroio Santa Bárbara é a transição entre o meio rural para meio urbano, representando, a barragem, um ponto divisor entre os dois meios. Como o trabalho propõe avaliar cenários extremos, como o transbordamento da barragem, foi necessário avaliar, em separado, a contribuição anterior à estrutura da barragem para a definição dos valores vertidos, e, posteriormente, trabalhou-se com os dados de vazão do vertedouro, somando-os à contribuição das bacias urbanas para gerar os mapas de inundação.

Para obter a quantidade de contribuição (chuva) das bacias (hietogramas de projeto) que abastecem a barragem para diferentes tempos de retorno, empregou-se a equação 2, com base na IDF de Pelotas (DORNELLES, 2017).

$$I = \frac{1100 \cdot Tr^{0,163}}{(t+16,47)^{0,766}} \quad (2)$$

em que,

I = intensidade da chuva

Tr = Tempo de retorno

t = duração da chuva

Para transformação chuva-vazão, a princípio, calculou-se o tc pela fórmula de *Kirpich* (Equação 3), por se adequar às características das bacias (área menor que 1000 ha; a maior bacia possui 864 ha). Para o cálculo do tlag (Equação 4) utilizou-se a relação de 60% do tc de acordo com Mockus (1957); Simas (1996), mas também poderia se utilizar o método do SCS para o cálculo do tlag (MOCKUS, 1961).

$$tc = 57 \cdot L^{1,155} \cdot H^{-0,385} \quad (3)$$

em que,

tc = tempo de concentração

L = comprimento do talvegue

H = diferença da maior e menor cota

$$tLag = 0,6 \cdot tc \quad (4)$$

em que,

tLag = tempo de retardo

tc = tempo de concentração

Os valores para Curva Número (CN), referentes às características de escoamento de diferentes tipos de solos, foram calculados com base em mapas de uso e ocupação do solo já existentes e validados com o arquivo da ANA, com valores de CN para as bacias ottocodificadas.

A partir do tLag, CN e dos hietogramas de projeto, calculou-se os hidrogramas de projeto para cada sub-bacia através do HEC-HMS. Assim, utilizou-se os métodos de perda: SCS – Curva Número e o de transformação: SCS – Hidrograma Unitário Triangular.

Avaliou-se a contribuição das bacias rurais, a montante da barragem e, a partir delas, verificou-se a variação da altura da lâmina da água armazenada, e determinou-se a vazão do vertedouro.

Essa vazão vertida foi somada à contribuição da parte urbana. Como a estrutura urbana de drenagem é mais complexa de analisar, em função da configuração dos elementos que compõem o ambiente urbano (ambiente modificado, com “sistemas de drenagem artificial”), trabalhou-se com a entrada direta dos dados de chuva sobre essa área, em função de possibilitar a verificação do comportamento diferenciado no ambiente urbanizado (Figura 6).

Modelagem Hidrológica

Bacia Hidrográfica do Arroio Santa Bárbara (BHASB)

MDE - SRTM (30 m)

ArcMap + HEC-GeoHMS

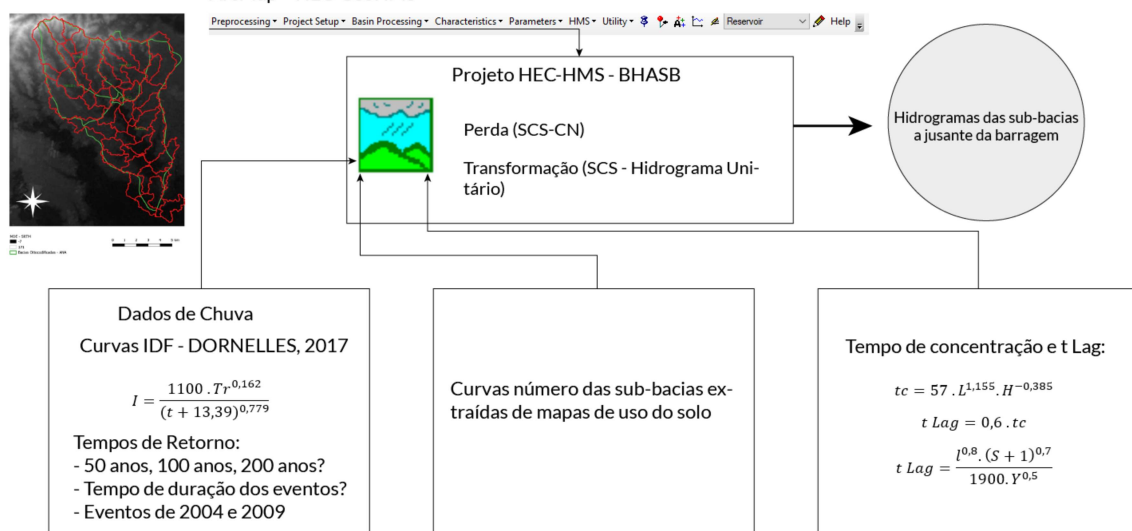


Figura 6 - Esquema da metodologia proposta: Modelagem hidrológica.

3.3 Batimetria da barragem

O entendimento do fundo da barragem Santa Bárbara foi possível através de um levantamento batimétrico com o qual foi possível levantar a informação da profundidade da área da barragem, em um levantamento realizado durante o período de 29/07/2020 até 01/08/2020. Esse levantamento envolveu várias atividades distintas, descritas na sequência.

Em 29/07/2020, realizou-se o levantamento empregando o sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*) para determinar as coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude geométrica) de um ponto denominado de “base”, ponto esse que será utilizado posteriormente para os demais horizontal de 10 mm+1ppm e precisão vertical de 20 mm+1ppm. Para obtenção de coordenadas geodésicas do ponto “base”, situado na plataforma sobre maciço da barragem (Figura 7), realizou-se

um rastreamento de três horas, com uma taxa de coleta de dados de um segundo. Na Figura 7, abaixo, apresenta-se a localização do ponto base, bem como o equipamento utilizado nesse levantamento. O método empregado em campo foi o relativo estático e o receptor utilizado foi o modelo GNSS S82T L1/L2 RTK. Esse equipamento, com o emprego desse método, tem precisão

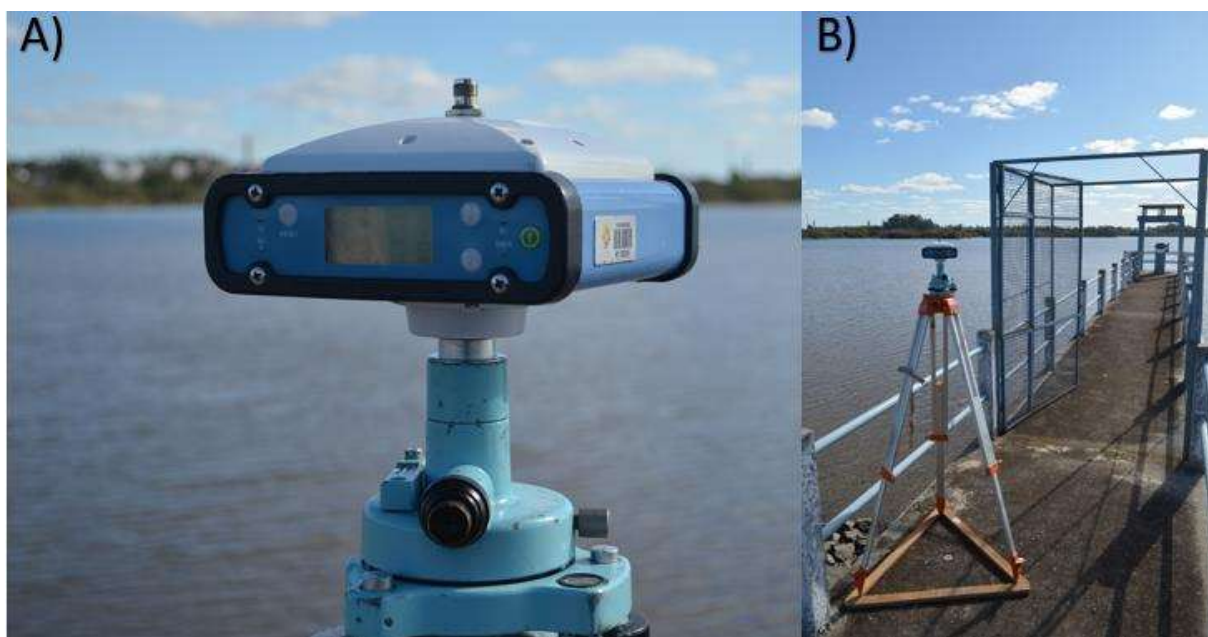


Figura 7 – Estação de GPS para definição da coordenada da estação base do RTK. A) Receptor GPS de dupla frequência. B) Localização da estação base.

A Tabela 3 apresenta os valores das coordenadas geodésicas tridimensionais (latitude e longitude), representadas em graus (°), minutos (') e segundos ("), referenciadas ao SIRGAS2000, obtidas com um desvio padrão inferior a 2 cm. Também se apresentam as coordenadas projetadas no sistema UTM (*Universal Transversa de Mercator*) em metros. Essas coordenadas foram obtidas a partir do processamento IBGE-PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), que é um serviço *on-line* e gratuito de pós-processamento de dados disponibilizado pelo IBGE.

Tabela 3 - Coordenadas geodésicas do ponto "base" em SIRGAS2000

	Coordenadas no Sistema de Referência SIRGAS				
	Latitude ° ' "	Longitude ° ' "	Altitude Geométrica (m)	UTM N (m)	UTM E (m)
Em 2000.4	-31°43'45,6955"	-52°22'08,6340	20,91	6488747,061	370300,533
Na data do levantamento	-31°43'45,6878"	-52°22'08,6351	20,91	6488747,298	370300,501

Sigma (95%)⁶ (m)	0,005	0,020
Modelo Geoidal	MAPGEO2015	
Ondulação Geoidal (m)	9,07	
Altitude Ortométrica (m)	11,84	

A determinação das coordenadas geodésicas tem por finalidade determinar, de forma precisa, as coordenadas de um ponto que será utilizado como base para levantamentos posteriores, por exemplo, quando emprega-se a técnica RTK.

No dia 30/07/2020, foi realizado o processo de colocação da régua linimétrica para referência das medições de profundidade a partir da sonda batimétrica durante a navegação. A régua linimétrica foi fixada na estrutura de concreto da mesma plataforma do vertedouro de fundo da barragem, sobre o qual estava o ponto da “base. Para essa atividade a equipe utilizou uma embarcação do tipo chata para ir até a local e fixar a régua (Figura 8).

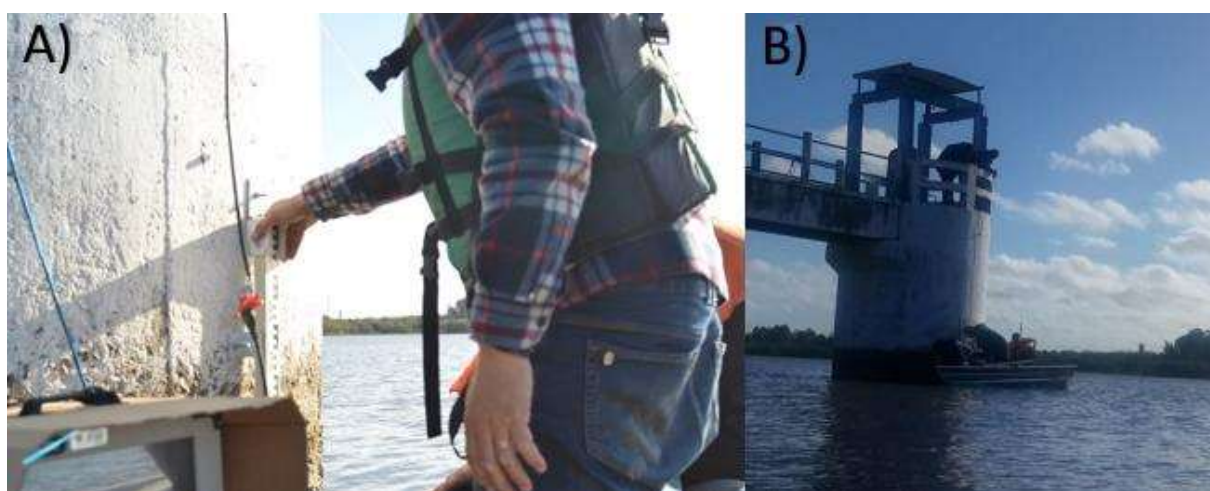


Figura 8 – Instalação da régua linimétrica. A) Dispositivo de fixação. B) Localização da régua.

Conforme pode ser verificado pela Figura 9 (a seguir), a régua foi fixada de forma a marcar exatamente a 1 (um) metro até o ponto zero de profundidade de água. Essa régua foi observada a cada hora durante todo o processo de coleta dos dados batimétricos, visando verificar se houve variação do nível do reservatório, o qual não ocorreu. Posteriormente, essa régua foi utilizada para amarrar os pontos fixados no paredão da barragem com as informações de profundidade oriundas da batimetria.

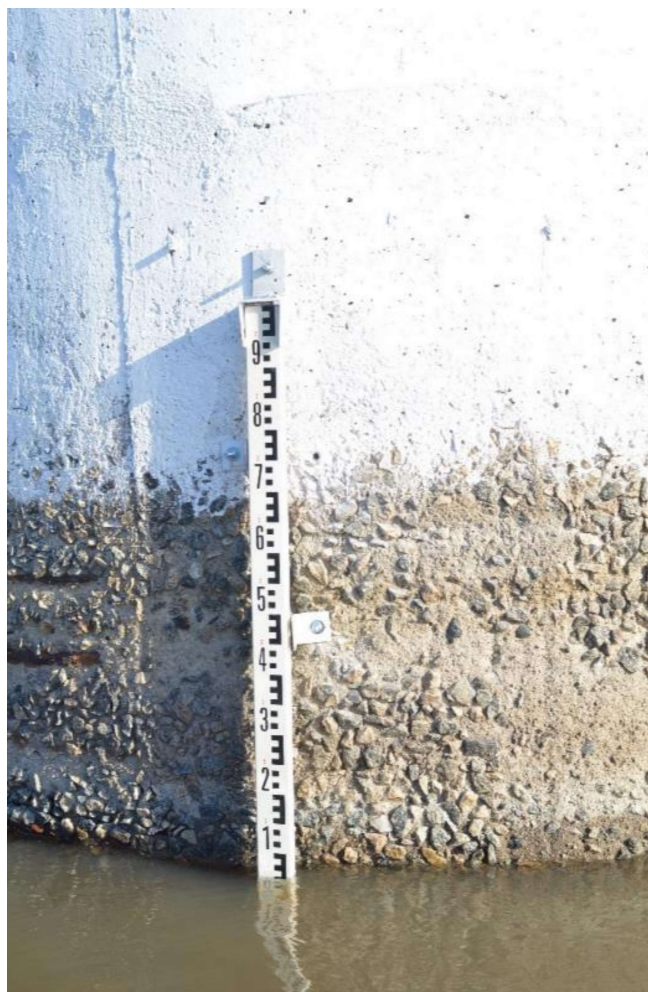


Figura 9 – Régua instalada na estrutura de concreto da plataforma da barragem.

A navegação para coleta dos dados de profundidades foi realizada em dois dias (31/06 e 01/07). Nesses dias, o ecobatímetro foi instalado em um barco do tipo chata. O modelo utilizado foi o ecobatímetro South SDE-28S (Figura 10), monofeixe, com tela TFT-LCD de 12,1 polegadas integrada, frequência de 200 kHz, ângulo de feixe 7, resolução de profundidade 0,1 ft/0,01 m, acurácia de $\pm 1\text{cm} \pm 0,1\text{ D}$ (0,1% do valor de profundidade) (SOUTH, 2010). A sonda e antena GNSS foram instaladas no mesmo bastão, para que os valores de *offset* entre os sensores GPS e sonda instalados fosse nulo, e esses foram inseridos nos ecobatímetro, assim como a profundidade da sonda com relação à linha de água.



Figura 10 – Ecobatímetro. A) Modelo do ecobatímetro. B) Sonda. C) Barco - Chata. D) Tela TFT-LCD.

Para calibrar o ecobatímetro, isto é, verificar se as profundidades medidas e informadas, estavam corretas, foi utilizado o acessório da Figura 12 do Laboratório de Tecnologia da Geoinformação da FURG, o qual possui demarcações a cada 50 cm. Esse também serviu durante os levantamentos como um equipamento de segurança para evitar que a sonda batesse no fundo em águas rasas.



Figura 11– Acessório para verificar profundidade.

Para determinar as coordenadas geodésicas dos pontos, essas que foram obtidas as profundidades com o levantamento batimétrico, empregou-se a técnica de posicionamento RTK. A estação base foi montada no ponto do vertedouro de fundo, ponto denominado de “base”. Na base instalou-se o receptor GNSS modelo S82T L1/L2 RTK, da marca GNSS South Surveying (Figura 13), esse é um equipamento de dupla frequência com 220 canais, o qual observa sinais GPS e Glonass, com precisão horizontal de $\pm 8 \text{ mm} + 1 \text{ ppm RMS}$ e vertical $\pm 15 \text{ mm} + 1 \text{ ppm RMS}$ e tempo de inicialização inferior a 8 segundos. Esse equipamento tem um rádio interno com alcance de oito quilômetros e um externo com alcance de 15 quilômetros. Para aplicar

a técnica RTK foram inseridas, nesse equipamento, as coordenadas geodésicas precisas do ponto base, essas que podem ser visualizadas na Tabela 1.

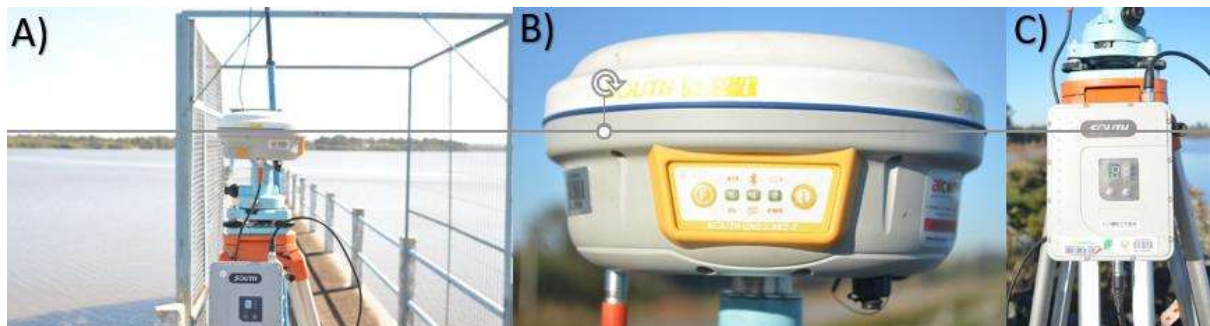
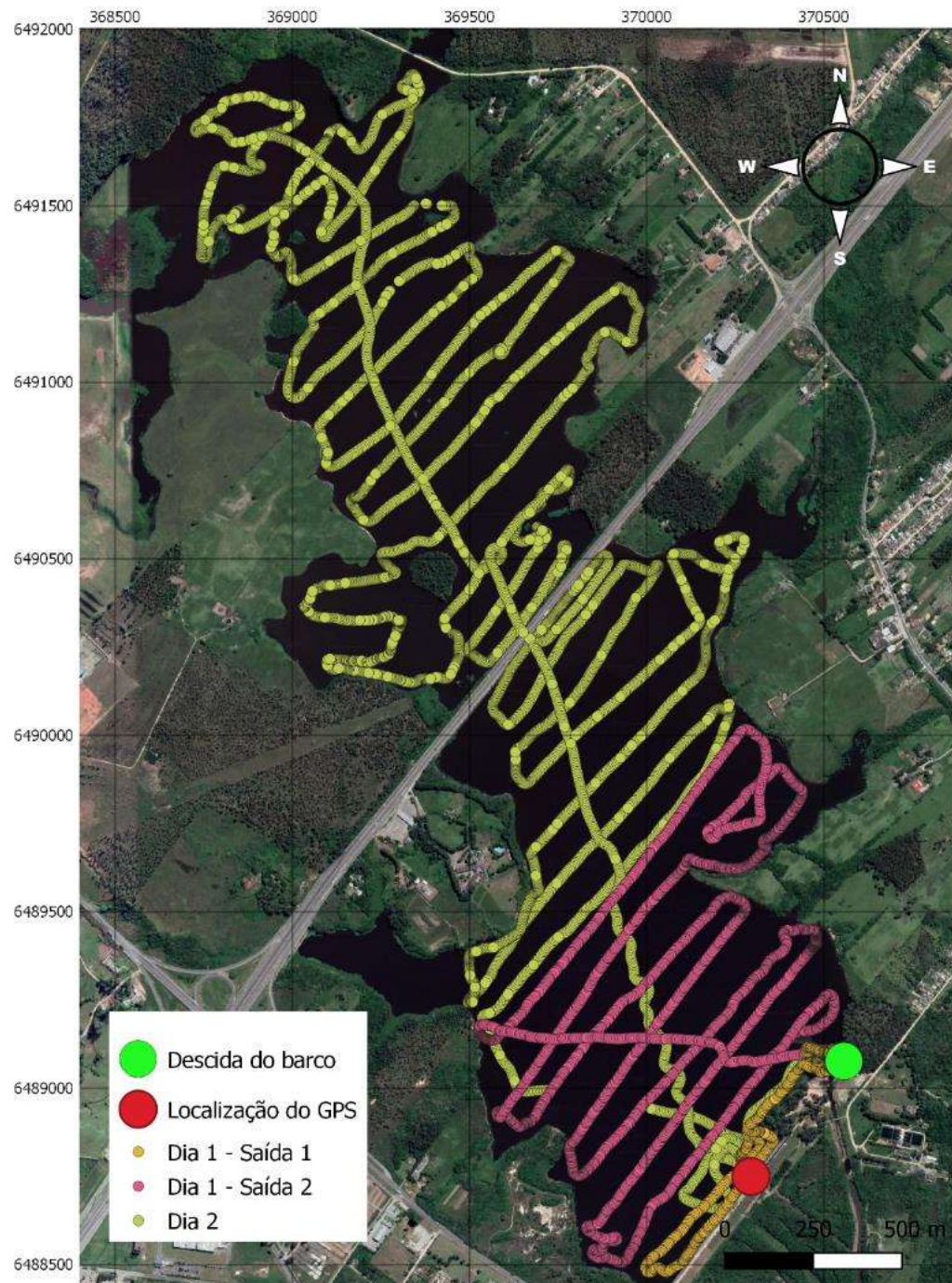


Figura 12 – Equipamentos utilizados na base A) receptor GNSS S82T L1/L2 RTK instalado. B) Antena GNSS. C) Rádio.

No planejamento prévio para a definição das linhas de sondagem, definiu-se linhas transversais dispostas de forma regular a cada 100 m. No mapa (Figura 14), são apresentadas as rotas navegadas, e a indicação dos pontos amostrados durante a sondagem, dispostas de forma regular, e em linhas de zigue-zague e aleatórias. Os pontos de sobreposição entre as linhas de sondagem serviram como método de validação da qualidade dos dados batimétricos, possibilitando a comparação das profundidades obtidas para um mesmo ponto em dois momentos distintos.

Pontos coletados durante as navegações



Escala 1:15.000

EPSG:31982
SIRGAS 2000 UTM 22S

Figura 13 – Linhas de sondagem.

As linhas de sondagem foram percorridas em dois dias, como pode ser observado acima, na Figura 14. Algumas áreas não foram possíveis de navegação

em função da baixa profundidade na qual se encontrava o nível da água nos dias da sondagem. Um caso excepcional foi o primeiro braço à esquerda da barragem, onde não foi possível realizar a coleta de dados em função da presença de uma mangueira que se encontra no local, próximo aonde os pontos demarcados no mapa deixam de existir. Posteriormente, foi realizado um pós-tratamento dos valores de profundidade para remoção dos valores suspeitos de leitura (*outliers*), em função da baixa precisão dos dados lidos pela sonda para regiões mais rasas. Essa tarefa foi feita a partir da análise dos dados brutos, observando as discrepâncias no ambiente de planilhas eletrônicas.

Para a geração dos produtos finais – que permitiriam a representação das isóbatas (linha que representa em corpos d'água pontos de mesma profundidade), da topografia submersa do reservatório atrelados ao sistema de referência oficial do Brasil (SIRGAS2000) – houve a necessidade do nível de redução de observação, por meio de uma amarração entre o levantamento geodésico das coordenadas tridimensionais obtidas para cada sondagem de profundidade ao sistema da barragem. Ação que possibilita a comparação e variação ao longo do tempo.

Para isso, nos dias 04, 05 e 08/08/2020 se realizou o nivelamento geométrico de visadas iguais (Figura 15), com nivelamento e contra-nivelamento, para controle da qualidade. Com esse nivelamento obtiveram-se as seguintes altitudes ortométricas: da régua linimétrica, dos detalhes do vertedouro, dos pontos de profundidade perto da margem e das RNs implantadas no entorno do barramento.



Figura 14 – Equipamentos utilizados para topografia A) Nível eletrônico. B) Régua com código de barras.

Na área anterior ao vertedouro da barragem, na qual a profundidade do reservatório foi inferior a 50 cm, foi realizado um levantamento topobatimétrico. O equipamento utilizado foi o nível eletrônico modelo Sprinter 250M, da marca Leica, e duas miras de código de barras. Assim, os valores de profundidade coletados foram então transformados em valores altimétricos, a partir do ajuste das alturas do ponto base GPS e da régua instalada. A Equação 5* utilizada teve como base a altura referenciada nos dias de navegação, onde a régua se encontrava. A equação de transformação de valores é:

$$H_{orto} = h_{GPS} - profundidade - h_{régua} - \Delta Z_{régua} \quad (5)$$

em que,

H_{orto} : Altitude ortométrica de cada ponto sondado no reservatório;

h_{GPS} : Altitude ortométrica do ponto da Base GNSS

$profundidade$: profundidade sondada para cada ponto do reservatório

$h_{régua}$: Altitude ortométrica da base superior da régua linimétrica

$\Delta Z_{régua}$: Distância base superior da régua linimétrica e a linha de água (nesse caso 1m)

Sequencialmente, foram realizados alguns testes de interpolação de dados para verificar qual algoritmo interpolador melhor se adequaria ao tipo de dado possuído, assim como foram adicionados valores de altimetria nas bordas, oriundos do modelo digital da área urbana de Pelotas. O método de interpolação final adotado foi o *Topo To Raster* do ArcToolBox.

3.4 Uso do solo

Com a finalidade de definir o uso do solo na bacia e mapear a impermeabilidade do solo, informação essencial na determinação do comportamento da precipitação e a sua transformação em escoamento, foram utilizados dados oriundos de Sensoriamento Remoto.

Para extrair os segmentos e realizar a classificação das imagens, com base nas características espectrais da superfície da BHSB, o sensor selecionado para utilização foi a câmera Multiespectral MUX do CBERS-4, que cobre quatro faixas

espectrais com comprimentos de ondas de 450 nm a 890 nm, visada de 120 km, espacial nominal de 20 metros ao nadir (DIAS et al., 2010). A imagem utilizada foi coletada no dia 14 de março de 2018, com o satélite posicionado na órbita 158, ponto 136 (Figura 16).

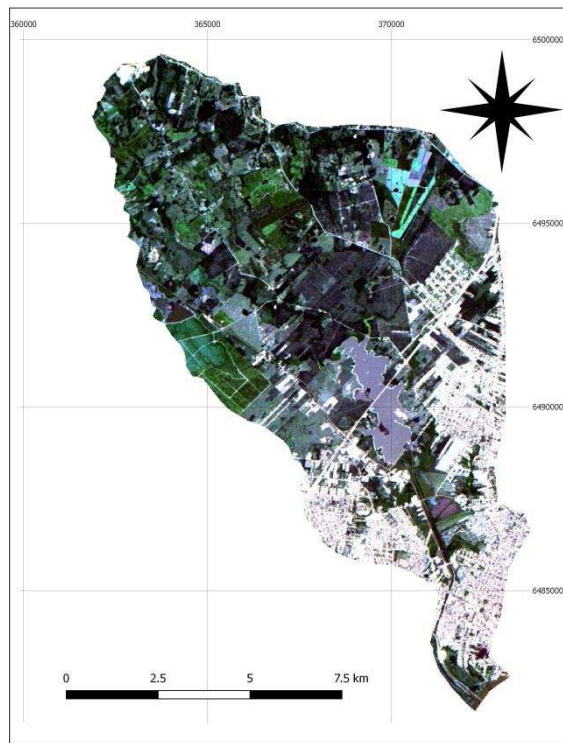


Figura 15 - Imagem CBERS-4 MUX.

Com a finalidade de limitar a área da imagem de satélite obtida através da página do INPE, a área total do *raster* foi recortada a partir do dado vetorial com os limites da bacia hidrográfica. O diagrama da metodologia aplicada sobre os dados, até a obtenção dos dados estatísticos representativos da qualidade da classificação gerada, está demonstrado na Figura 17.

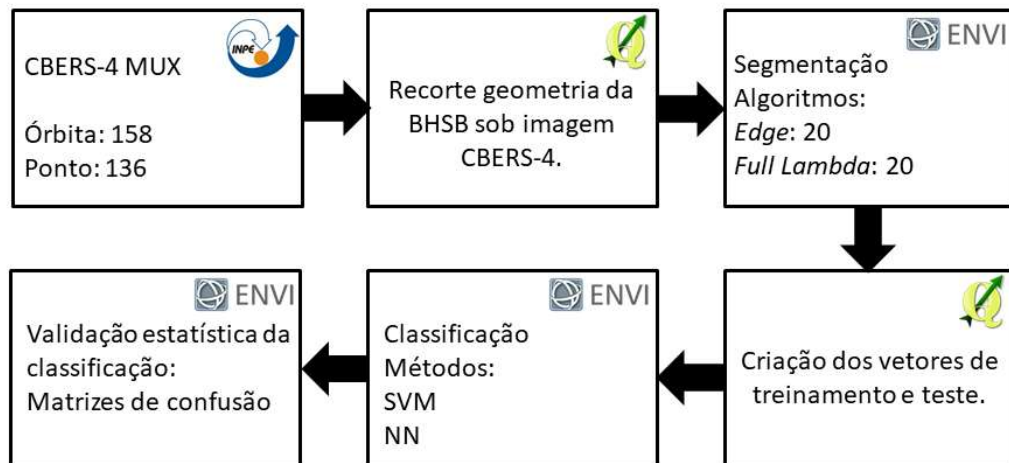


Figura 16 - Diagrama metodológico para classificação de imagens.

Com a finalidade de subdividir a imagem em polígonos representativos, estatisticamente de parâmetros da imagem, a segmentação foi a primeira etapa aplicada, no sentido de extrair áreas representativas das classes propostas para a classificação.

Segmentação de imagens é a forma de particionar um arranjo de medidas com base na homogeneidade. Ela divide uma imagem ou *raster* em regiões homogêneas que são espacialmente contínuas e desarticuladas, os chamados ‘segmentos’, primeira etapa para a determinação de ‘objetos significativos’ (BLASCHKE et al., 2014).

A segmentação da imagem de satélite CBERS-4 foi realizada no programa ENVI 5.3, através da ferramenta *Feature Extraction>Segment Only Feature Extraction Flow*. Os algoritmos utilizados para criação dos objetos foram o algoritmo *Edge* (*Segment Settings*) e *Full Lambda Schedule* (*Merge Settings*). A calibragem dos parâmetros utilizados por tais algoritmos foram feitos através de análise visual dos resultados obtidos, com um valor final estipulado de:

Segment Settings → *Scale Level*: 20,0.

Merge Settings → *Merge Level*: 20,0.

Texture Kernel Size: 3.

Uma das formas mais clássicas de representar a capacidade de escoamento de um solo, baseado na combinação empírica do grupo do solo, cobertura do solo e condições de umidade antecedentes, é o método criado pelo Soil Conservation

Service intitulado Curva Número (CN). A organização americana, com base em estudos em diferentes sítios com condições diversificadas, construiu tabelas com valores numéricos variados de zero a cem, que guiam na determinação dos valores de CN. As Tabelas 4 e 5, demonstradas a seguir, são uma adaptação realizada a partir das tabelas criadas pela SCS, buscando, dentro da escala da imagem utilizada no trabalho, propor classes a serem utilizadas para a classificação de imagens.

Tabela 4 - Valores de CN para coberturas do solo em meio rural.

Descrição de cobertura		Curva número para cada grupo hidrológico do solo			
Tipo de cobertura	Condição hidrológica	A	B	C	D
Pastagem, pradaria - forragem contínua para pastagem	Ruim	68	79	86	89
	Razoável	49	69	79	84
	Boa	39	61	74	80
Moitas, arbustos - mistura de erva, grama e moitas como elemento principal	Ruim	48	67	77	83
	Razoável	35	56	70	77
	Boa	30	48	65	73
Florestas - combinados com gramas (pomares ou fazendas de árvores)	Ruim	57	73	82	86
	Razoável	43	65	76	82
	Boa	32	58	72	79
Florestas	Ruim	45	66	77	83
	Razoável	36	60	73	79
	Boa	30	55	70	77

Tabela 5 - Valores de CN para coberturas do solo em meio urbanizado.

Descrição de cobertura	Curva número para cada grupo hidrológico do solo			
	A	B	C	D
Áreas impermeáveis: Estacionamentos pavimentados, telhados, estradas, etc.	98	98	98	98

Com base nas informações extraídas das tabelas adaptadas do SCS, e pelas classes de uso do solo identificadas visualmente a partir da imagem de satélite, foram selecionadas as seguintes classes a serem utilizadas nos algoritmos de classificação de imagens:

- a) Meio urbanizado
- b) Água
- c) Floresta
- d) Solo Exposto
- e) Campo
- f) Meio cultivado

A partir dos objetos criados a partir da segmentação e da imagem CBERS-4, com auxílio da ferramenta de vetorização do *ENVI 5.3*, foram selecionados os objetos com base nas seis classes acima expostas para a etapa de treinamento nos algoritmos de classificação de imagem. De acordo com Lei Ma (2017), o sistema OBIA tem sido bem verificado para a classificação de imagens de média a alta resolução, sendo que, dentro desse sistema, os algoritmos de classificação com maior sucesso em prever corretamente apontados são os classificadores supervisionados e os métodos *fuzzy*. Com base na pesquisa de revisão desenvolvida pelos autores, os algoritmos de classificação supervisionada *Single Vector Machine (SVM)*, *Neural Networks (NN)*, *Decision Trees*, *Random Forest* e *Maximum Likelihood Classifier* são considerados os métodos com maior sucesso na aplicação de análise digital de imagens com a finalidade de classificação orientada a objeto. Por tal razão, e pela compatibilidade do *software ENVI 5.3* utilizado no estudo, os métodos SVM e NN foram escolhidos para realização da classificação do uso de solo na BHSB.

Como forma de avaliação da qualidade da classificação realizada, foram calculadas as matrizes de confusão a partir do arquivo matricial calculado e das amostras de teste criadas sobre a imagem de satélite CBERS-4.

3.5 Método IMAAI

O método IMAAI (Instrumento para o Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Alagamentos e Inundações Urbanas) se baseia em métodos clássicos de análise multivariada e foi desenvolvido para que possa ser aplicado por analistas ambientais sem a necessidade de conhecimento aprofundado em SIG, podendo ser desenvolvido com dados que estão disponibilizados gratuitamente nas plataformas de bancos de dados ambientais brasileiras e através de softwares livres (CAPRARIO; FINOTTI, 2019).

Para se mensurar a susceptibilidade, é necessário um somatório ponderado por pesos, que são atribuídos a cada uma das classes dos diferentes fatores considerados de maior potencial de influência em eventos de inundações urbanas (Tabela 6).

Tabela 6 - Fatores, classes, pesos e fonte dos dados utilizados para o mapeamento de susceptibilidade na Bacia Hidrográfica do Santa Bárbara (BHSB).

Fator (<i>F</i>)	Classes	Pesos (<i>p</i>)	Fonte dos dados
Altimetria	0m - 250m	10	Modelo Digital de Elevação (SRTM)
Declividade	0% - 3%	10	Modelo Digital de Elevação (SRTM)
	3% - 8%	7	
	8% - 20%	5	
Hidrografia	Existente	7	Agência Nacional de Águas (ANA)
	Inexistente	3	
Drenagem	Inexistente	7	MUB Pelotas
	Existente	3	
Uso do solo	Área urbanizada	10	IBGE
	Água	10	
	Lavoura	5	
	Pastagem	4	
	Vegetação florestal	1	
Pedologia	Corpos d' água	10	EMBRAPA
	Meio urbano	10	
	Organossolo	9	
	Planossolo	8	
	Argissolo	5	
Medidas de compensação	Inexistentes	10	MUB PELOTAS
	Barragem	1	
Precipitação média anual	1200mm-1500mm	5	EMBRAPA

4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, é apresentada, na seção 4.1, uma proposta metodológica para desenvolvimento dos índices de risco atrelados a eventos extremos de inundação, de forma que possa ser replicado a outras áreas de estudo. Na seção 4.2 é apresentado o mapeamento em pequena escala de risco da Bacia Hidrográfica do Santa Bárbara, utilizando o método IMAAI para situações em que não existem dados de qualidade à disposição. Na seção 4.3, apresenta-se o resultado do levantamento batimétrico da barragem Santa Bárbara como uma forma de detalhar reservatórios e permitir o uso de técnicas de mapeamento de risco mais eficazes. O Item 4.4 descreve a forma de obtenção e apresenta os dados obtidos para Classificação do solo na área da BHASB.

4.1 Proposta metodológica para mapeamento de risco

As etapas para o desenvolvimento dos índices de risco, mapeamento, análise estatística e validação dos resultados é descrita na Figura 18. O primeiro passo consiste na definição do *framework* conceitual (KULTURisk) sob o qual serão extraídos os conceitos relacionados à gestão de risco. Em seguida serão definidos os indicadores responsáveis pela representação de cada um dos aspectos relacionados ao risco ocasionado por inundações urbanas. Para cada um dos indicadores devem ser adquiridos os seus dados representativos, os quais posteriormente são separados em índices de impacto positivo ou negativo.

Uma vez que muitos dados, dentro da análise de risco a inundações, podem acabar se tornando repetitivos dentro da representação dos seus diversos aspectos, a redução dos dados através da análise multivariada (Passo 3) é essencial para uma representação não redundante dentro do projeto. Dessa forma, a quarta etapa objetiva a construção do risco e classificação dos índices propostos, conforme seu grau de importância, para isso foi utilizado um método de decisão multicritério (MCDM).

O Passo 5 consiste na determinação do escore padrão (Z-Score) e geração dos mapas de risco, que devem ser validados frente a dados observados de inundações urbanas de eventos reais (Passo 6).

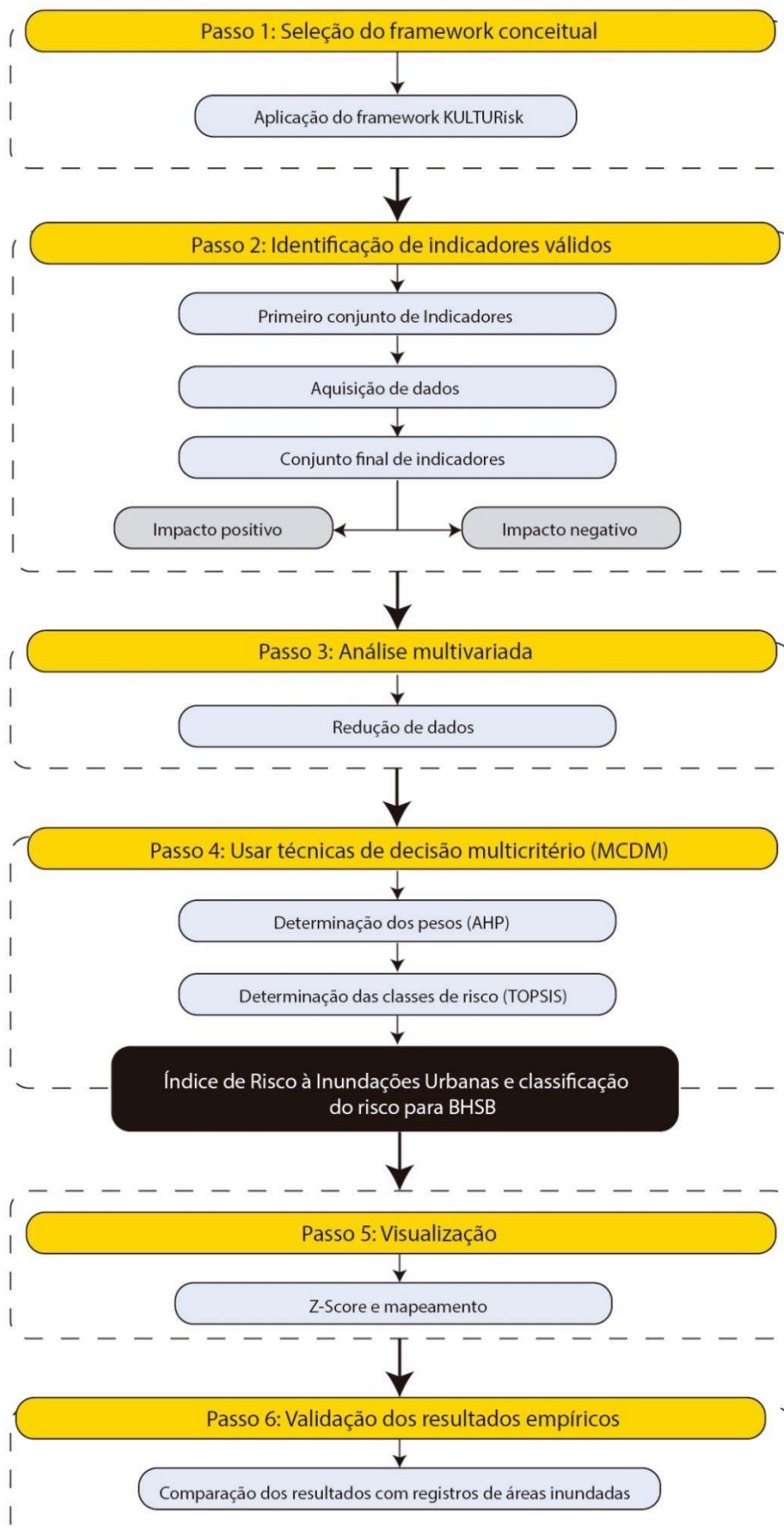


Figura 17 – Etapas para o desenvolvimento de mapas de risco.

O risco a inundações existente na bacia deve ser avaliado em função de três fatores principais: a perigosidade, ocasionada pelos eventos de inundação urbana; a vulnerabilidade do ambiente; e o nível de exposição em que se encontra a área de estudo (Figura 19).

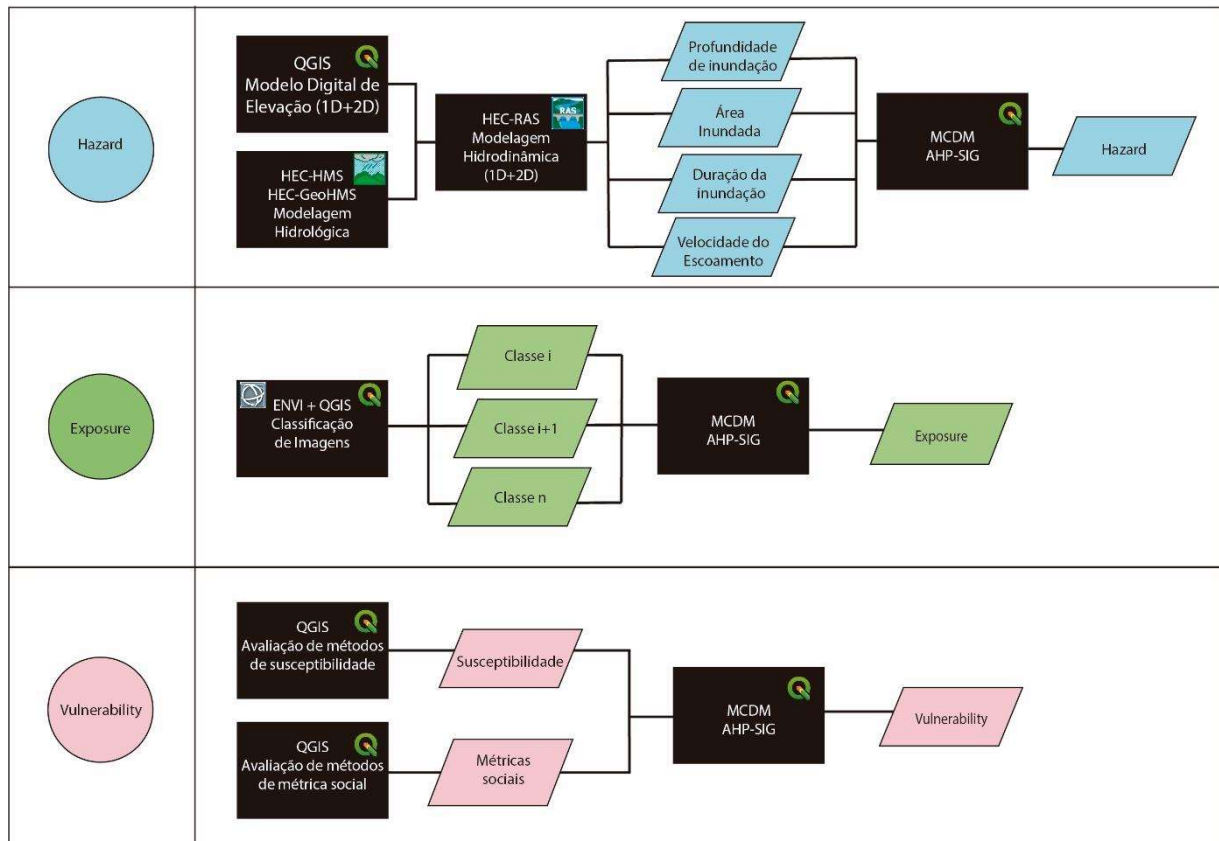


Figura 18 – Fluxogramas para o desenvolvimento dos critérios principais.

Esses fatores são critérios principais para construção da matriz de risco, logo, para cada critério principal foram definidos os critérios secundários (exemplos: profundidade, velocidade, tempo de inundação, uso do solo, áreas residenciais). A partir de diferentes cenários, baseados nos critérios secundários, diferentes simulações e matrizes de risco devem ser propostas, permitindo a previsão de possíveis eventos e o impacto causado por alterações no meio físico e ocupação do solo.

Para cada um dos critérios de avaliação de risco devem ser coletados e gerados dados buscando a melhor representatividade desses índices. A metodologia proposta para o desenvolvimento das informações dos índices exposição, vulnerabilidade e perigosidade serão descritas individualmente nos itens subjacentes.

4.1.1 Exposição

Os parâmetros de risco que envolvem o aspecto de exposição têm como base as informações relacionadas com o uso do solo. Como as informações vetoriais disponíveis nas plataformas governamentais do Brasil se encontram na escala inadequada para este estudo, propõe-se o desenvolvimento de dados através do uso de classificação de imagens orientada a objeto para o desenvolvimento de um dado com qualidade para se adequar ao modelo de risco proposto atendendo uma escala de 1:2.000.

Além da obtenção das classes de uso do solo, dado representativo da exposição da área de estudo, a partir dessa informação podem ser obtidos outros dados essenciais para o processo de modelagem hidrológica da bacia, os valores de coeficiente de Manning e Curva Número, necessários para aplicação no desenvolvimento dos valores de perigosidade. A classificação de imagens foi realizada com auxílio dos *softwares* ENVI e QGIS. Nesses programas foram determinadas as amostras de treinamento e teste através do método de segmentação que, posteriormente, foram utilizadas para calibragem dos modelos de classificação de imagens utilizando imagens do satélite CBERS 4 (Figura 20).

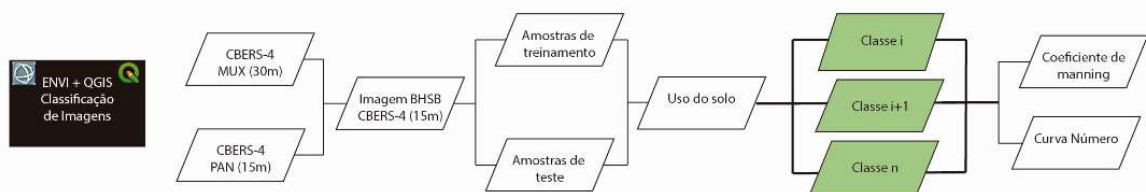


Figura 19 – Fluxograma para o desenvolvimento do critério exposição.

4.1.2 Vulnerabilidade

Os modelos digitais de elevação são dados básicos para aplicação em diversas etapas dos diferentes processos de quantificação da perigosidade e vulnerabilidade da bacia. Como esses diferentes processos foram testados e realizados com graus de exigência de resolução variados, acredita-se que podem ser utilizados principalmente três modelos digitais de representação de terreno (Figura 8):

- a) Modelo SRTM com resolução de 30 m;
- b) MUB (Mapa Urbano Básico) de Pelotas com resolução de 0,50 m;
- c) Fusão dos dois modelos com resolução de 10 m.

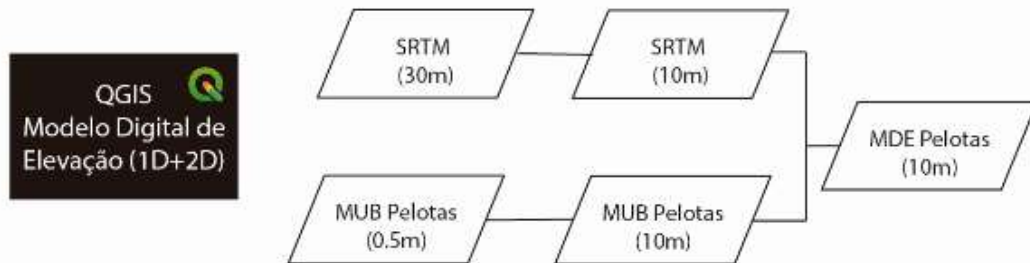


Figura 20 – Fluxograma para o desenvolvimento do MDE.

Esses modelos podem precisar passar por possíveis ajustes, os quais são realizados nos arquivos *raster* como: preenchimento de pixels sem dados, remoção de pontes, ajustes de obras hidráulicas (canais e vertedouro), etc. Esses ajustes devem ser aplicados antes dos processos de modelagem, conforme as exigências anteriormente concebidas pelos modelos.

O mapeamento de susceptibilidade ambiental indica áreas sujeitas a serem inundadas com maiores vulnerabilidades ao serem acometidas por tais eventos, podendo ser utilizado como uma ferramenta de prevenção, quando utilizada por gestores públicos no planejamento e gestão do espaço urbano. No presente trabalho, o método IMAAI (Instrumento de Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Alagamentos e Inundações), desenvolvido por Caprario e Finotti (2019), foi utilizado para geração dos mapas de susceptibilidade. Esse método foi escolhido por trazer índices representativos de vulnerabilidade, e ser aplicável na área da BHASB, mesmo quando existe uma falta significativa de informações sociais disponíveis para tais estudos.

O método IMAAI (CAPRARIO; FINOTTI, 2019) se baseia em métodos clássicos de análise multivariada e foi desenvolvido para que possa ser aplicado por analistas ambientais sem a necessidade de conhecimento aprofundado em SIG, podendo ser desenvolvido com dados que estão disponibilizados gratuitamente nas plataformas de bancos de dados ambientais brasileiras e através de *softwares* livres. Nele, a susceptibilidade é mensurada a partir de um somatório ponderado por pesos, que são atribuídos a cada uma das classes dos diferentes fatores considerados de maior potencial de influência em eventos de inundações urbanas (Tabela 7).

Tabela 7 - Fatores, classes, pesos e fonte dos dados utilizados para o mapeamento de suscetibilidade na Bacia Hidrográfica do Santa Bárbara (BHSB).

Fator (<i>F</i>)	Classes	Pesos (<i>p</i>)	Fonte dos dados
Altimetria	0m - 250m	10	MUB Pelotas
Declividade	0% - 3%	10	MUB
	3% - 8%	7	Pelotas
	8% - 20%	5	
Hidrografia	Existente	7	Agência
	Inexistente	3	Nacional de Águas (ANA)
Drenagem	Inexistente	7	MUB
	Existente	3	Pelotas
Uso do solo	Área	10	IBGE
	Urbanizada		
	Água	10	
	Lavoura	5	
	Pastagem	4	
	Vegetação	1	
	Florestal		
Pedologia	Corpos d'	10	EMBRAPA
	Água		
	Meio urbano	10	
	Organossolo	9	
	Planossolo	8	
	Argissolo	5	
Medidas de compensação	Inexistentes	10	MUB PELOTAS
	Barragem	1	
Precipitação média anual	1200mm-1500mm	5	EMBRAPA

A aplicação do método foi realizada no *software* QGIS 3.4.5 (Figura 22). Com auxílio das ferramentas do programa, os arquivos vetoriais obtidos das fontes citadas na Tabela 7 foram transcritos em um índice de Suscetibilidade através das classes proposta por Caprario e Finotti (2019) e transformados para o formato matricial (*raster*).



Figura 21 – Fluxograma para o desenvolvimento do critério susceptibilidade.

O cálculo realizado para obtenção do mapa de susceptibilidade foi realizado através da ferramenta *Raster Calculator*, por meio do cálculo somatório ponderado por pesos, no qual a soma dos pesos respectivos de cada classe resulta no valor de susceptibilidade de cada pixel (Figura 23). Na equação, abaixo, é apresentada a fórmula de somatório ponderado por pesos:

$$Susceptibilidade = \sum_{i=1}^n p_n * F_n$$

em que,

F_n : fator de cada classe

p_n : pesos respectivos de cada classe

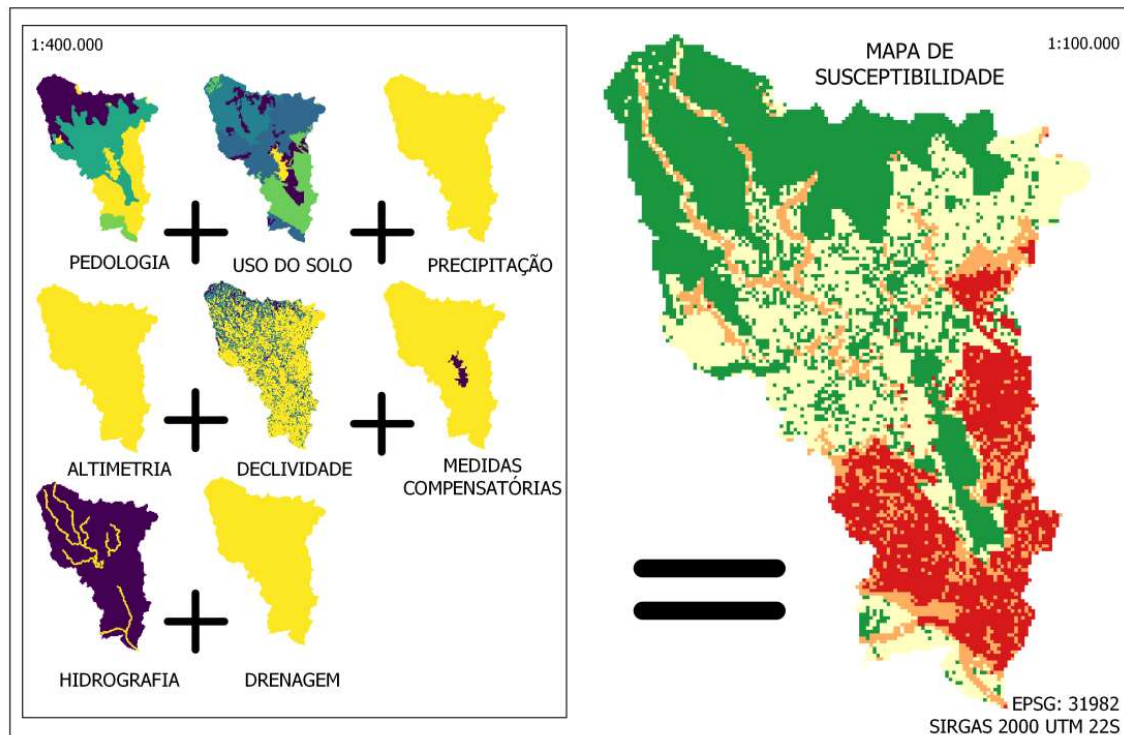


Figura 22 – Operação para geração do mapa de susceptibilidade.

4.1.3 Perigosidade (hazard)

A quantificação dos dados relacionados com a perigosidade inerente a diferentes eventos de inundações urbanas pode ser dividida em duas etapas: Primeiramente a modelagem hidrológica, que tem como objetivo a extração dos valores de precipitação e escoamento dentro das determinadas sub-bacias inseridas na BHASB; e, em segundo momento, a representação da hidrodinâmica relacionada com eventos hidrológicos calamitosos dentro da área urbana da bacia.

A Figura 24 descreve a primeira etapa da modelagem hidrológica que consiste no cálculo de todos os parâmetros hidrológicos que posteriormente devem ser utilizados para as transformações chuva-vazão, assim como a separação das sub-bacias que foram utilizadas como unidade limítrofe para aplicação dos modelos hidrológicos a partir do uso do *software* HEC-HMS. Essa etapa foi realizada a partir do uso da extensão HEC-GeoHMS desenvolvida para o *ArcMap 10.4*.

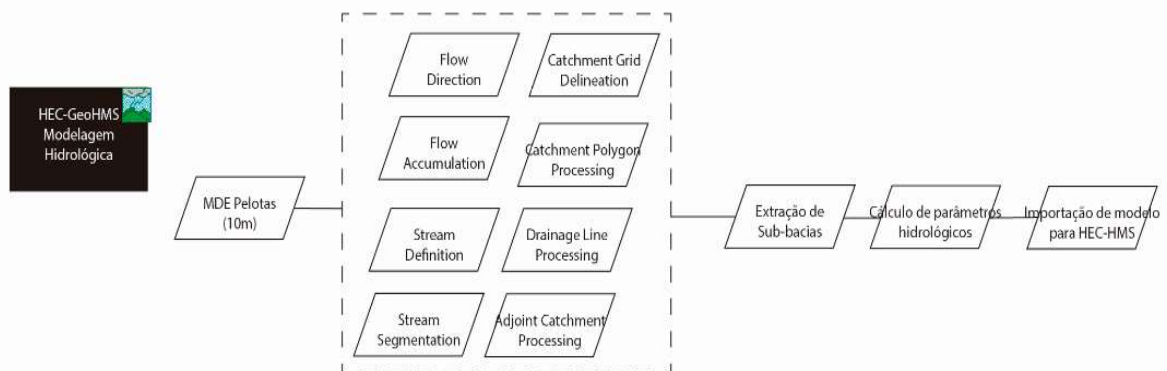


Figura 23 - Fluxograma para o desenvolvimento do processo de modelagem hidrológica.

Como o projeto se trata de eventos extremos em ambientes urbanos, somente foram considerados, no modelo hidrológico, os fatores precipitação e escoamento superficial dentro da bacia. Para a determinação das precipitações frente a diferentes cenários de tempo de retorno será utilizada a equação IDF (DORNELLES, 2017), a partir desses valores foram construídos os hietogramas de precipitação efetiva através do método SCS CN que são transformados em vazões a partir do método SCS do Hidrograma Unitário (Figura 25).

Tendo em vista a presença da barragem intermediando a zona rural e zona urbanizada da bacia, foi necessária uma abordagem diferenciada de cálculo para que o fator de frenagem de escoamento ocasionado por essa grande área de reservatório pudesse ser levado em consideração de forma efetiva. Para tal, a vazão contribuinte de todas as bacias afluentes da barragem foi levada em consideração para aplicação de um método de propagação de onda em reservatório.

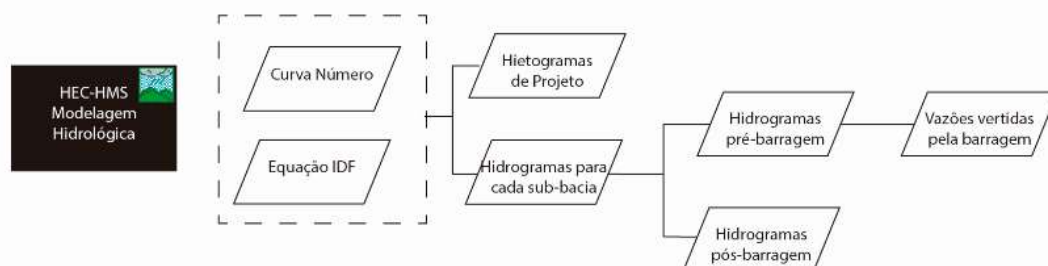


Figura 24 – Fluxograma para o desenvolvimento do processo de modelagem hidrológica.

Para o processo de modelagem hidrodinâmica (Figura 26) foi utilizado um modelo digital de elevação da área da bacia e sobre o qual foram construídos todos

os aspectos geométricos necessários para a realização das simulações de escoamento. A partir dos dados de vazão vertidos pela barragem, somados das vazões dos hidrogramas de cada uma das bacias urbanas encontradas a jusante da barragem do Santa Bárbara, e dos valores de coeficiente de Manning, foram realizadas as simulações que proporcionarão os valores de profundidade, área inundada, duração da inundação e velocidade do escoamento.

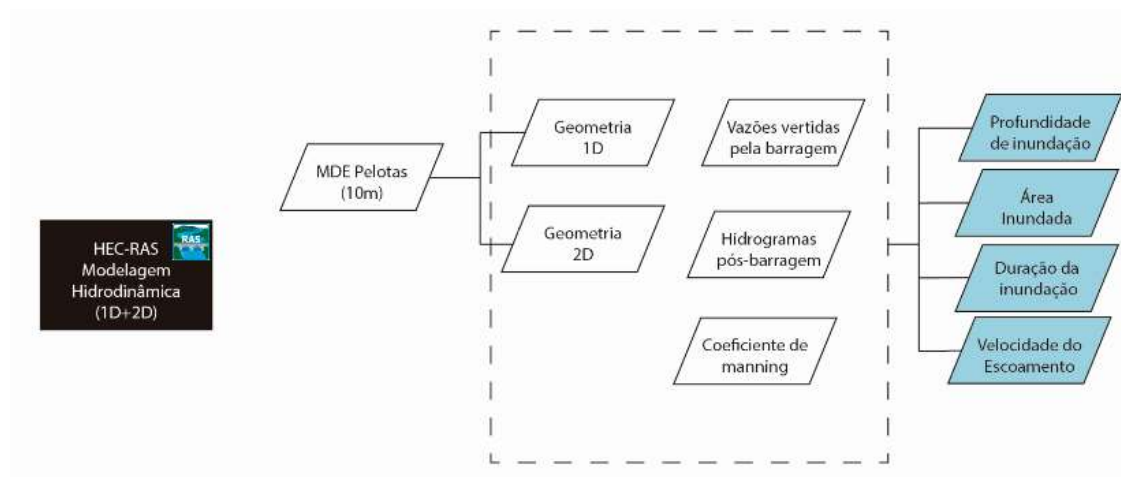


Figura 25 – Fluxograma para o desenvolvimento do processo de modelagem hidrodinâmica.

4.2 Mapeamento de risco da Bacia Hidrográfica do Santa Bárbara– panorama? em pequena escala

Na Figura 27, é apresentado o resultado dos mapas de susceptibilidade para a área de estudo da Bacia Hidrográfica do Santa Bárbara, pelo método IMAAI (Instrumento para o Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Alagamentos e Inundações Urbanas), desenvolvido por Caprario e Finotti (2019). O mapa de susceptibilidade ambiental foi classificado, conforme o seu potencial de risco, em baixo, moderado, alto e extremamente alto, posto que esse mapeamento de susceptibilidade ambiental indica áreas sujeitas a serem inundadas, e pode ser utilizado como uma ferramenta de prevenção quando utilizada por gestores públicos no planejamento e gestão do espaço urbano (PERUZZO; LEANDRO, 2019).

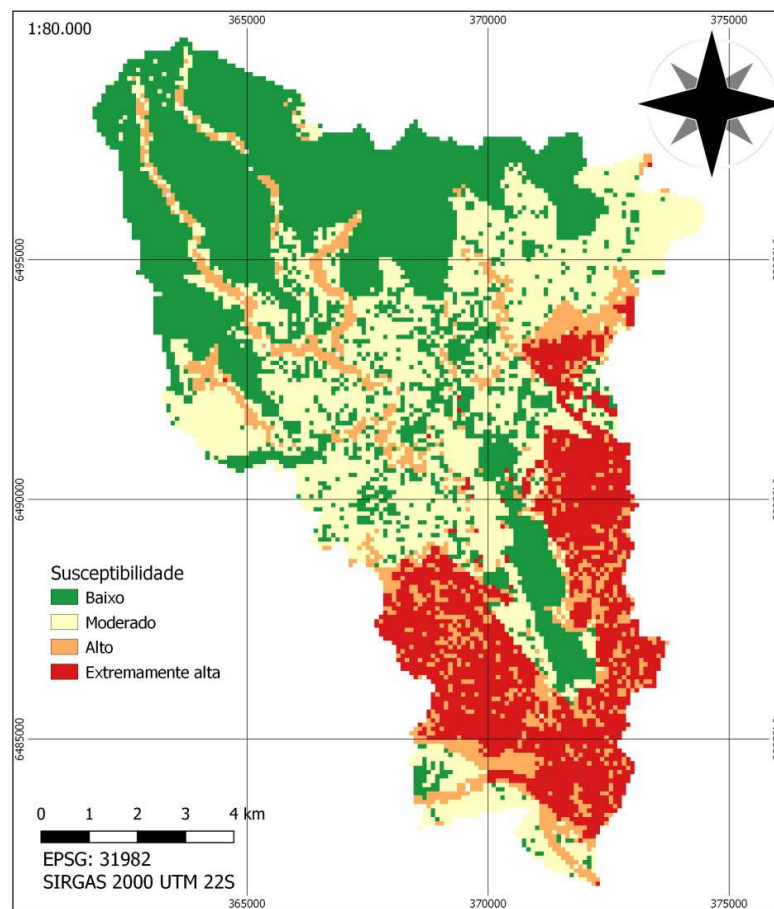


Figura 26 – Mapa de susceptibilidade.

O mapeamento pode ser destacado como uma alternativa de baixo custo e com relativa fácil implementação (SHIDAWARA, 1999), sendo um dado indicativo do possível risco e impacto ambiental associado com eventos de inundação ocasionados por eventos extremos de precipitação que ocorrem seguidamente no município de Pelotas (RASERA; CAMPOS, 2017). Então o mapeamento pelo método IMAAI permite verificar um padrão para ocorrência de maiores níveis de susceptibilidade nas áreas urbanizadas próximas da barragem e canal do Santa Bárbara. O antigo leito do arroio, área historicamente afetada por problemas de inundação, também se encontra na classe mais alta para risco, o que se justifica pelos valores de declividade proporcionados pelo terreno e em função do avanço da urbanização sobre essa região (PERUZZO; LEANDRO, 2019).

Mapeamento de risco em escalas menos detalhadas são essenciais no Brasil, considerando a inexistência de cultura cartográfica no país, pois permitem que municípios que não possuem nem um tipo de dado em escala de 1:5.000 a 1:1.000 ainda possam se adequar às diretrizes de Gestão e Prevenção de Áreas de Riscos a

Desastres Naturais, as quais os órgãos gestores de defesa civil responsáveis pela resposta aos desastres deveriam incentivar e desenvolver junto aos municípios brasileiros, preparando as comunidades expostas ao risco, podendo simular uma situação futura em que um evento possa acontecer e afetar essas áreas.

4.3 Batimetria da barragem

Nesta seção são apresentados os produtos oriundos do levantamento batimétrico do reservatório da Barragem Santa Bárbara. Na Figura 28 é demonstrado o mapa batimétrico, com a variação da profundidade da água. A variação da profundidade na região foi entre 0,0 m e 7,8 m. Na diagonal central do reservatório, observa-se o leito original do Arroio Santa Bárbara com as maiores profundidades. Com exceção da área central, o restante do relevo do reservatório é de característica plana, com poucas variações de profundidade. O entendimento da característica do fundo para reservatórios é essencial para o processo de simulação de eventos extremos, facilitando a previsão de efeitos desses eventos nos processos de inundação da barragem.

Percebe-se também que, imediatamente anterior ao vertedouro, as profundidades são baixas, existindo uma área que aponta acúmulo de sedimentos depositados pelo sentido do escoamento existente na área alagada da barragem, representando uma área importante para planos de futuras manutenções da barragem.

Pode ser constatado, a partir das linhas de navegação utilizadas e os valores coletados para profundidade, que existe a formação do arroio e de seus bancos na parte central da área alagada. Com base nessa informação, uma interpolação de dados altimétricos foi realizada para o preenchimento dos valores de bancos e calha, seguindo o sentido de maior profundidade da calha do Arroio Santa Bárbara.

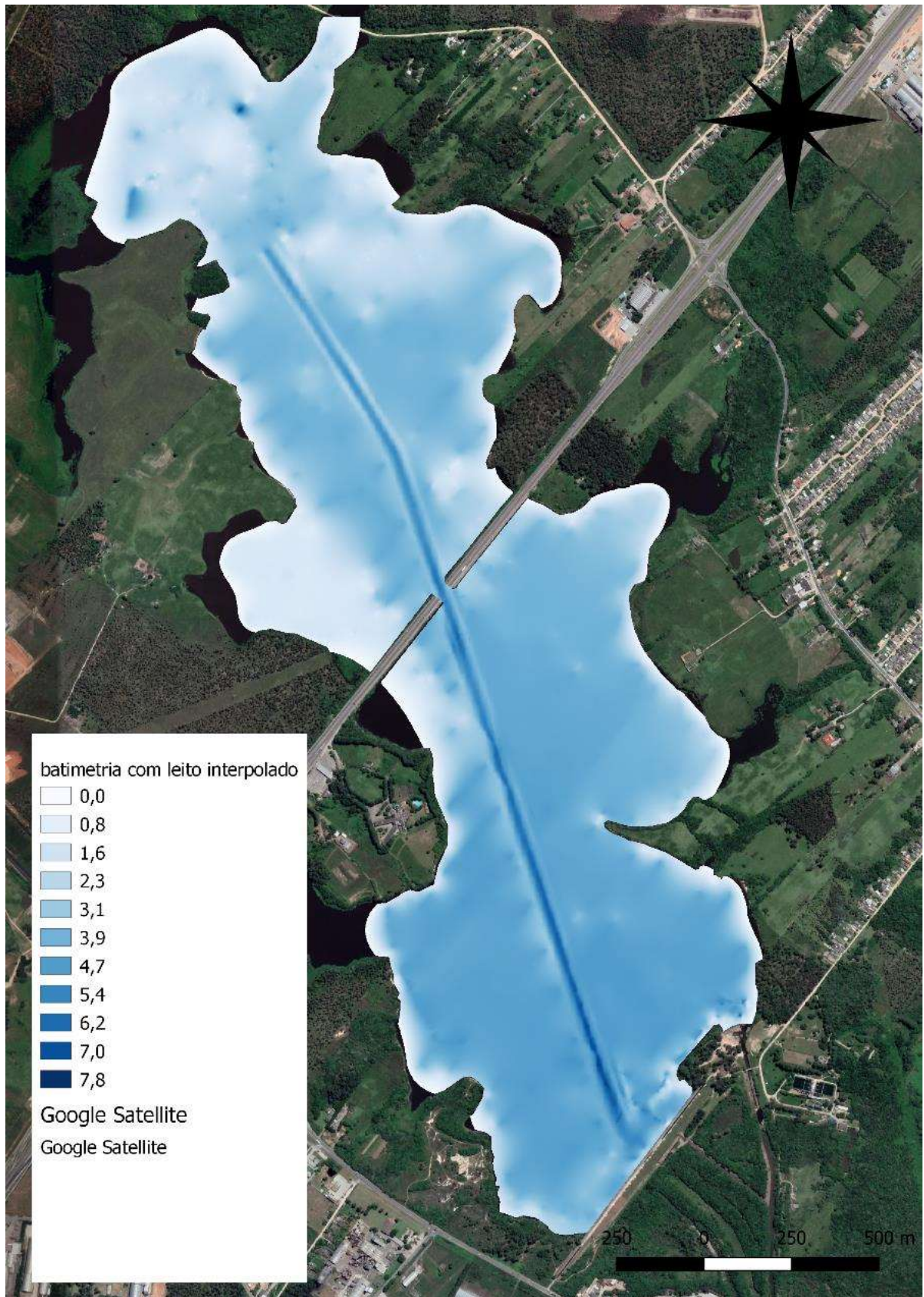


Figura 27 – Modelo Batimétrico do reservatório

Como pode ser verificado, a área da lâmina da água não foi totalmente mapeada somente com os dados de batimetria. Essa situação é comum nesses levantamentos devido à impossibilidade de navegação em áreas com profundidades inferiores a 50 cm, devido ao risco de danificar a sonda do ecobatímetro. Para ser possível extrair os dados de curva de nível para toda área inundada da barragem, foi necessário ajustar os dados batimétricos com as informações existentes nos dados topográficos do MUB, para área do entorno da barragem, e, assim, interpolar os valores para as áreas faltantes a partir das duas informações.

Desse modo, na Figura 29, pode ser observada a junção dos dados da batimetria sem *outliers* com o Modelo Digital de Superfície do MUB. O produto gerado é essencial para a gestão do reservatório, possibilita, por exemplo, estimar o grau de assoreamento, calcular volumes de armazenamento, subsidiar informações aos órgãos competentes para tomadas de decisões na área.

para simulação do comportamento do reservatório, baseados em relatórios e previsões climáticas.

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, as necessárias informações batimétricas são essenciais para a manutenção da barragem do Santa Bárbara. Permitem também realizar a propagação da onda na barragem, para simulações de eventos extremos e delimitação de áreas de risco, o que só é possível atrelando a complementação com informações das suas condições e topografia em escala detalhada, por exemplo, 1:2.000.

Além disso, o “Mapa Batimétrico da Barragem Santa Bárbara – Pelotas/RS” foi entregue em 09 de outubro de 2020 ao coordenador do Departamento de Tratamento do SANEP, Engenheiro Vinicius Gonçalves, para as atividades de manutenção básica no reservatório, além de incentivar a gestão e desenvolvimento de soluções eficazes para combate a riscos e desastres ambientais. Essa foi a primeira vez que a empresa responsável recebeu um levantamento batimétrico da área da barragem do Santa Bárbara.

4.4 Classificação do uso de solo

Nessa seção são apresentados os resultados do processo de classificação de uso do solo para a Bacia da Barragem Santa Bárbara para a proposta metodológica de mapeamento de risco apresentada na seção 4.1, no item exposição. Inicialmente, a avaliação da qualidade do processo de classificação é essencial para a solidez e robustez dos processos de simulação, pois mostraram sua proximidade com a realidade local.

Como forma de avaliação da qualidade da classificação realizada, foram calculadas as matrizes de confusão (Tabelas 8 e 9), a partir do arquivo matricial e das amostras de teste criadas sobre a imagem de satélite CBERS-4.

Tabela 8 - Matriz de confusão SVM.

Dados de referência								
	Classe	Urbanizado	Água	Floresta	Solo Exposto	Campo	Cultivo	Total
Amostras de treinamento	Não-classificado	0	0	0	0	0	0	0
	Urbanizado	465	0	0	18	0	0	483
	Água	0	751	0	0	2	0	753
	Floresta	0	6	382	0	0	2	390
	Solo Exposto	14	0	0	371	0	0	385
	Campo	1	0	15	10	551	0	577
	Cultivo	0	0	3	4	0	534	541
	Total	480	757	400	403	553	536	3129

Tabela 9 - Matriz de confusão NN.

Dados de referência								
	Classe	Urbanizado	Água	Floresta	Solo Exposto	Campo	Cultivo	Total
Amostras de treinamento	Não-classificado	0	0	0	0	0	0	0
	Urbanizado	471	0	0	56	3	0	527
	Água	0	751	0	13	2	0	767
	Floresta	0	6	386	0	0	1	395
	Solo Exposto	8	0	0	320	0	0	328
	Campo	1	0	13	8	548	5	575
	Cultivo	0	0	1	6	0	530	537
	Total	480	757	400	403	553	536	3129

Como demonstra os valores da Tabela 10, ambos os algoritmos SVM e NN obtiveram valores estatísticos de grande qualidade para as classes de treinamento e teste selecionados na classificação realizada. O algoritmo SVM, com pequena superioridade em relação ao NN, se mostra a escolha mais adequada para a obtenção das classes de uso do solo na BHSB.

Tabela 10 - Acurácia e Coeficiente Kappa obtidos na classificação de imagens.

	Acurácia	Coeficiente Kappa
SVM	97.60%	0.9709
NN	96.07%	0.9523

Na Figura 16, tem-se o mapa do uso do solo da BHSB a partir do algoritmo de classificação SVM. Observa-se que a bacia do Arroio Santa Bárbara, a jusante do reservatório, possui áreas extremamente urbanizadas, e consequentemente um quantitativo significativo de pessoas em risco, visto que essas áreas apresentam um relevo plano ou quase plano, que, concatenado a solos com má drenagem, possibilita o acúmulo de água durante eventos extremos, tornando comuns pontos de inundação.

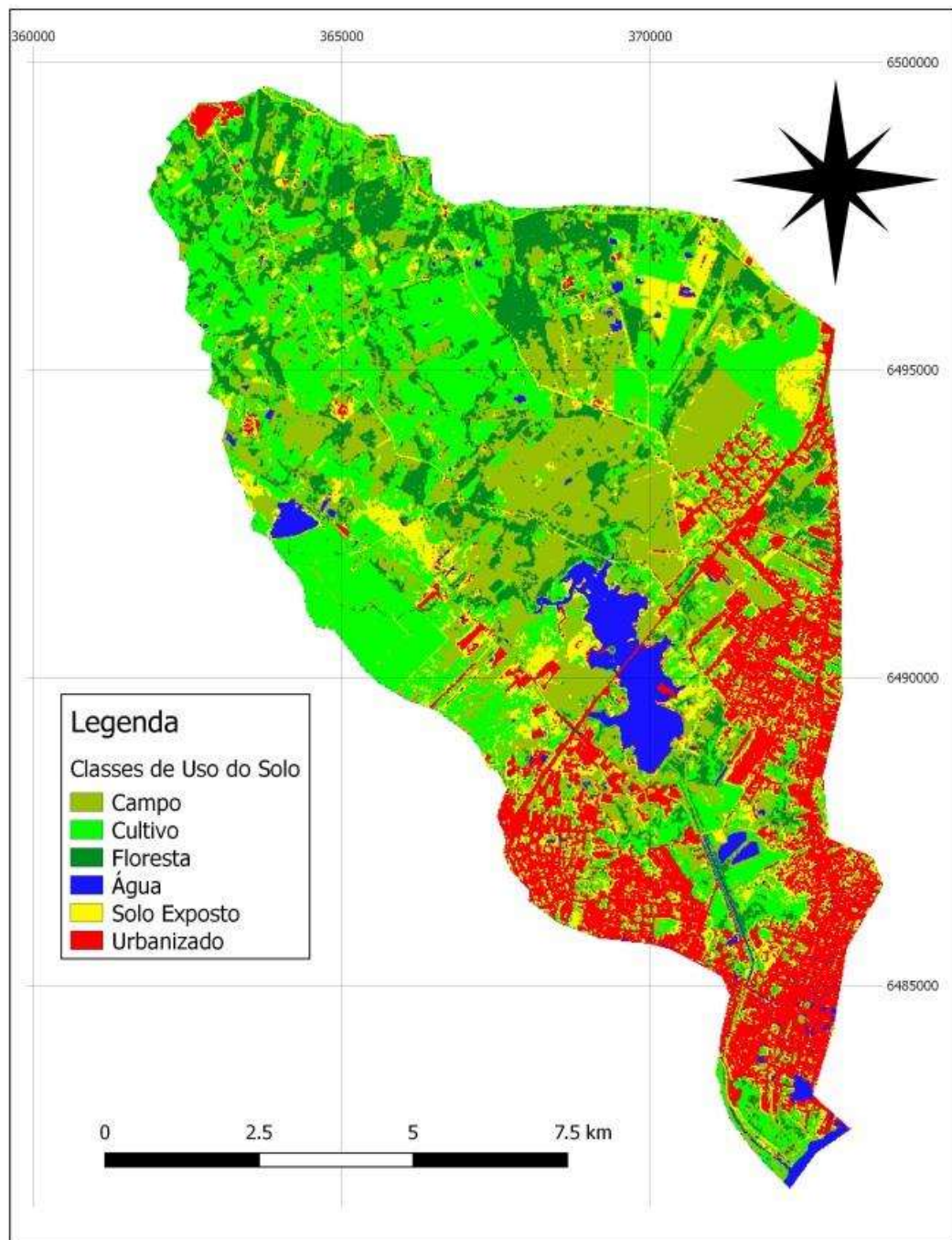


Figura 29 – Mapa de classificação dos solos.

Percebe-se que, a montante do reservatório, a região é composta por campos, áreas de cultivo e floresta, com relevo mais acidentado que a jusante, tornando essas áreas de menor risco. No entanto, a avaliação integral da bacia de interesse é o que possibilita, de acordo com Leandro (2021), um bom planejamento e desenvolvimento das estratégias de redução de desastres, tornando possível elaborar medidas

preventivas, planificar emergências e estabelecer ações conjuntas entre a população e o poder público, permitindo a intervenção necessária face aos desastres naturais.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

De acordo com as metodologias de avaliação de risco à inundação revisadas, as quais sugerem índices aplicáveis à modelagem de risco, foram levantadas uma série de informações necessárias para a preparação e desenvolvimento dos seguintes estudos que possibilitaram a proposição de uma metodologia de mapeamento de áreas de risco de inundação, aplicável à área da BHASB.

A partir da avaliação dos dados necessários para o preenchimento dos requisitos necessários aos modelos de risco, foram desenvolvidos, além de uma série de informações a serem publicadas posteriormente ao trabalho, os estudos referentes ao mapeamento de suscetibilidade a inundações urbanas, a batimetria e o mapeamento de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica.

O mapa batimétrico e seus subprodutos, pela primeira vez desenvolvidos e disponibilizados para estudos sobre a barragem do Arroio Santa Bárbara, é um grande avanço para a gestão das questões relativas ao reservatório que há tanto tempo serve para o abastecimento de água do município, assim como agente atenuante de efeitos de inundação na parte urbana da BHASB.

O desenvolvimento de mapas em maior escala, de um mapa de uso e ocupação dos solos, é outro avanço na disponibilidade de informações com maior qualidade sobre áreas de gestão municipal em várias esferas. Futuros estudos serão desenvolvidos na busca de aplicar modelos de classificação de imagens para áreas urbanas, a partir das imagens do MUB de Pelotas, ampliando ainda mais a qualidade das informações de uso e ocupação dos solos no município.

O índice de suscetibilidade traz, em uma escala menor, a indicação de áreas que estão mais vulneráveis a impactos negativos ocasionados por eventos de inundação. Para um entendimento em escala maior, estudos futuros serão realizados a partir dos dados de batimetria e uso do solo desenvolvidos nesse trabalho.

Devido à falta de dados base para elaboração dos índices necessários para aplicação dos modelos de risco a inundação, foi necessário grande empenho no levantamento e ajuste de informações coletadas e já dispostas pelo município. Os futuros estudos darão segmento à proposta do trabalho de realizar o mapeamento de inundações frente a diferentes cenários para a BHAS, assim como a avaliação das

medidas de prevenção e atenuação que podem ser tomadas sob o acometimento de eventos tais.

A partir das informações já existentes, e da elaboração dos seguintes estudos, será desenvolvido um livro em parceria com a Defesa Civil de Pelotas e o SANEP, para que semelhantes modelos de risco possam ser reconhecidos e aplicados em outras bacias hidrográficas de Pelotas e outros municípios do estado.

REFERÊNCIAS

- 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, M. T. et al. Numerical modeling techniques for flood analysis. **Journal of African Earth Sciences**, v. 124, p. 478–486, dez. 2016.
- BATES, P. D. et al. Chapter 9 - Progress Toward Hyperresolution Models of Global Flood Hazard. In: MICHEL, G. (Ed.). **Risk Modeling for Hazards and Disasters**. Elsevier, 2018. p. 211–232.
- BERTILSSON, L. et al. Urban flood resilience – A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning. **Journal of Hydrology**, 21 jun. 2018.
- BUARQUE et al. **Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação**. 2009.
- CAI, T. et al. Flood risk assessment based on hydrodynamic model and fuzzy comprehensive evaluation with GIS technique. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 35, p. 101077, abr. 2019.
- CAPRARIO, J.; FINOTTI, A. R. Socio-technological tool for mapping susceptibility to urban flooding. **Journal of Hydrology**, v. 574, p. 1152–1163, 1 jul. 2019.
- 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.
- CRICHTON, D. **The Risk Triangle**, pp. 102-103 in Ingleton, J. (ed.), *Natural Disaster Management*, Tudor Rose, London. 1999.
- EM-DAT; Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. **2013 – Disasters in Numbers**. 2014
- EUROPEU, P. 2007/60/CE. DIRECTIVA 2007/60/CE.
- FIELD, C.B., BARROS, V., STOCKER, T.F., DAHE, Q., 2012. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press.
- 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.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5ª edição. São Paulo: Atlas; 2010.

GIUPPONI, C. et al. Integrated Risk Assessment of Water-Related Disasters. In: **Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters**. Hazard and Disasters Series. 2014.

HAMMOND, M. J. et al. Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 1, p. 14–29, 2 jan. 2015.

HAMNETT, M. P. Natural Hazard Mitigation: Recasting Disaster Policy and Planning. **Journal of Planning Education and Research**, v. 19, n. 4, p. 427–428, jun. 2000.

JONKMAN, S. N. et al. Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands. **Ecological Economics**, Special Section: Integrated Hydro-Economic Modelling for Effective and Sustainable Water Management. v. 66, n. 1, p. 77–90, 15 maio 2008.

LEANDRO, D.; QUADRO, M. S. ; VIEIRA, D. S. ; SILVA, L. A. ; MARQUES, L. C. ; ZIRBES, E. R. ; ARAUJO, M. M. F. ; PONZI, G. T. ; CALDAS, L. B. ; DUARTE, V. D. ; CASTRO, A. S. . **DESASTRES NATURAIS EM ARAMBARÉ-RS**. COLEÇÃO DIAGNÓSTICO DOS DESASTRES NATURAIS NA METADE SUL DO RIO GRANDE DO SUL. 1. ed. Pelotas: LGEA, 2021. v. 1. 174p .

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de pesquisa**: planejamento e execução de pesquisas, amostragem e técnicas de pesquisa, elaboração, análise e interpretação de dados. 6ª edição. São Paulo: Atlas, 2007.

MERZ, B. et al. Fluvial flood risk management in a changing world. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 10, n. 3, p. 509–527, 16 mar. 2010.

MOREIRA, H.; CALEFFE, L. G. **Metodologia da pesquisa para o professor pesquisador**. 1ª edição. Rio de Janeiro: Lamparina, 2008.

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

MOYA QUIROGA, V. et al. Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. **RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua**, v. 3, n. 1, p. 25–33, 1 jan. 2016.

PERUZZO, Arthur S. **Proposta metodológica para simulação de inundações na Bacia do Santa Bárbara**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.

PERUZZO, A.S.; LEANDRO, L. MAPEAMENTO DE RISCO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SANTA BÁRBARA – APLICAÇÃO DO MÉTODO IMAAI. In: 5ª Semana Integrada de Inovação, Ensino, Pesquisa e Extensão - XXI Encontro de Pós-Graduação, 2019, Pelotas. XXI Encontro de Pós-Graduação. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2019. v. 1. p. 1-4.

RASERA, G.; CAMPOS, C. R. J. DE. ANÁLISE DE UM CASO DE ENCHENTE OCORRIDO NA REGIÃO DE PELOTAS-RS EM JANEIRO DE 2009. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 1, p. 052–060, 15 fev. 2014.

RODRIGUES, A. C. B. **Simulação hidrológica de cheias na Bacia do rio Cavaco em Angola**. 2014.

SAATY, T. L. Analytic Hierarchy Process. In: ARMITAGE, P.; COLTON, T. (Eds.). . **Encyclopedia of Biostatistics**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83, 2008.

SCHROEDER, A. J. et al. The development of a flash flood severity index. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 523–532, out. 2016.

SHAPIRO, A. F.; KOISSI, M.-C. Fuzzy logic modifications of the Analytic Hierarchy Process. **Insurance: Mathematics and Economics**, v. 75, p. 189–202, jul. 2017.

SHIDAWARA, M. Flood hazard map distribution. **Urban Water**, v. 1, n. 2, p. 125–129, 1 jun. 1999.

SOUTH. SDE-28S Digital Echo Sounder - Operation Manual, 2010.

TASCA, F. A.; ASSUNÇÃO, L. B.; FINOTTI, A. R. International experiences in stormwater fee. **Water Science and Technology**, v. 2017, n. 1, p. 287–299, 26 abr. 2018.

TAVARES, A. O.; SANTOS, P. P. DOS. Re-scaling risk governance using local appraisal and community involvement. **Journal of Risk Research**, v. 17, n. 7, p. 923–949, 9 ago. 2014.

TENG, J. et al. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling & Software**, v. 90, p. 201–216, 1 abr. 2017.

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

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

UNISDR, 2009. **2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction**. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf.

VIGLIONE, A.; ROGGER, M. Flood Processes and Hazards. In: **Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters**. Hazard and Disasters Series. 2014.

YANNOPOULOS, S. Environmental impacts and best management of urban stormwater runoff: measures and legislative framework. **Global NEST Journal**, v. 15, n. 3, p. 324–332, 21 maio 2013.