

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Deborah Dotta Corrêa

**Mapeamento de risco de inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí utilizando
descritores de terreno e aspectos socioeconômicos**

Florianópolis
2022

Deborah Dotta Corrêa

**Mapeamento de risco de inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí utilizando
descritor de terreno e aspectos socioeconômicos**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.
Orientador: Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe, Dr.

Florianópolis
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Corrêa, Deborah Dotta
Mapeamento de risco de inundação na Bacia Hidrográfica
do Rio Itajaí utilizando descritor de terreno e aspectos
socioeconômicos / Deborah Dotta Corrêa ; orientador, Pedro
Luiz Borges Chaffe, 2022.
65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,
Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Inundação. 3.
Mapeamento de risco. 4. Descritor de terreno. 5. Aspectos
socioeconômicos. I. Chaffe, Pedro Luiz Borges . II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Deborah Dotta Corrêa

**Mapeamento de risco de inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí utilizando
descritor de terreno e aspectos socioeconômicos**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 18 de julho de 2022.



Documento assinado digitalmente
Maria Elisa Magri
Data: 21/07/2022 17:40:57-0300
CPF: 044.011.369-50
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof.^a Maria Elisa Magri, Dr.^a
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
Pedro Luiz Borges Chaffe
Data: 21/07/2022 17:06:21-0300
CPF: 005.170.430-76
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof.^a Patricia Kazue Uda, Dr.^a
Avaliadora
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Roberto Fabris Goerl, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Dedico este trabalho a minha família e amigos que estiveram ao meu lado durante a graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pela educação e apoio durante a vida e a graduação, por serem meu porto seguro. Agradeço ao meu companheiro por estar ao meu lado e por tornar essa jornada mais leve.

Agradeço ao professor Pedro, que despertou em mim a paixão pela hidrologia e por ser o melhor professor que já tive. Agradeço por todas as conversas, conselhos de vida e ensinamentos. Agradeço pelo tempo, pela paciência, pelo incentivo e por acreditar em mim.

Agradeço aos professores da banca, Patricia e Roberto, por todas as contribuições para o meu trabalho. Agradeço também ao José pelas conversas e ensinamentos de programação.

Agradeço às minhas grandes amigas do início da faculdade, Eduarda e Rafaela, pela parceria em momentos difíceis e pelas risadas. Agradeço aos amigos que fiz durante o intercâmbio, em especial a Martina. Agradeço também às minhas amigas Taisa e a Marcela, por me acompanharem na reta final da faculdade e no estágio. Essas pessoas foram muito importantes durante a trajetória que me trouxe até aqui.

Agradeço também aos meus colegas e orientadores de estágio, em especial ao Fernando e ao Matheus, pelos ensinamentos ao longo dos meus dois anos de estágio, por acreditarem no meu potencial e por serem grandes amigos.

Agradeço também a UFSC pelo ensino público e de qualidade, que me proporcionou experiências em ensino, pesquisa e extensão, além de ter tido a oportunidade de realizar um intercâmbio acadêmico. Agradeço a CAPES pelo investimento em minha formação como profissional e pessoa durante esse período. Agradeço aos colegas e professores da UFSC, que de alguma forma contribuíram para minha formação.

*"Do rio que tudo arrasta se diz que é violento.
Mas ninguém diz violentas as margens que o comprimem."*

Bertolt Brecht (1898-1956)

RESUMO

Inundações são um dos desastres mais frequentes e devastadores para a sociedade, gerando impactos em todos os continentes habitados. Mapear e modelar a extensão da inundação com precisão é um desafio porque requer uma representação detalhada, computacionalmente exigente e com dados limitados dos processos hidrológicos e hidráulicos. Este trabalho tem o objetivo de mapear o risco de inundação da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí (BHRI) utilizando o descritor de terreno HAND e aspectos socioeconômicos. A escolha da bacia deveu-se pelo seu extenso histórico de eventos de inundação, sendo que a evolução dos desastres vem acompanhando o desenvolvimento econômico da região. Fez-se uma combinação dos três fatores de risco: perigo, exposição e vulnerabilidade. Para caracterizar o perigo, utilizou-se o descritor de terreno HAND e análise de extremos. Já para analisar a vulnerabilidade, considerou-se o Índice de Desenvolvimento Humano e distribuição populacional. Ainda, para determinar a exposição, usou-se luzes noturnas. Foram utilizadas manchas observadas nos municípios de Blumenau, Rio do Sul, Brusque, Gaspar e Taió, referentes ao evento extremo de setembro de 2011, para determinar a performance do descritor de terreno HAND em mapear inundações. As recorrências das manchas de inundação obtidas foram analisadas pela distribuição de Gumbel, cujo maior valor observado foi de 50 anos de recorrência. Os resultados indicaram que o melhor desempenho do modelo HAND foi obtido para o município de Rio do Sul, com índice de acerto de 86% e índice de ajuste de 75%. A maior parte da bacia foi classificada com risco baixo (93%) por estar fora dos limites da mancha de maior período de retorno observada. Dos 7% restantes, 90% foram classificados com risco médio, 8% com risco alto e 2% com risco severo. Uma análise multicritério pode ser empregada no futuro para validação e aprimoramento dos resultados. Com base na identificação das áreas mais afetadas, o mapeamento de risco de inundação pode ser uma ferramenta importante no planejamento urbano, definição de medidas de mitigação de inundações e de ações de resposta.

Palavras-chave: Inundação; Mapeamento de risco; Descritor de terreno; Aspectos socioeconômicos.

ABSTRACT

Floods are the most frequent disaster impacting society and all inhabited continents. Accurately mapping and modeling the extent of flooding is challenging because it requires a detailed, computationally demanding and data-limited representation of hydrological and hydraulic processes. This work aims to map the flood risk of the Itajaí River Basin using the HAND terrain descriptor and socioeconomic aspects. The choice of the basin was due to its extensive history of flooding events. The evolution of disasters has accompanied the economic development of its region. A combination of three factors was used to define the flood risk: hazard, exposure and vulnerability. To characterize hazard, the HAND terrain descriptor and flow frequency analysis were used. To analyze vulnerability, the Human Development Index and population distribution were considered. To determine exposure, nightlights were used. Flood extent events observed in the municipalities of Blumenau, Rio do Sul, Brusque, Gaspar and Taió were used to determine the performance of the HAND terrain descriptor in mapping floods. The return period of floods was analyzed, whose highest value was 50 years regarding the September 2011 event. The best performance of the model was obtained for the municipality of Rio do Sul, with correctness index of 86% and fit index of 75%. Most of the basin was classified as low risk (93%), for being outside the limits of the flood extent with the longest observed return period. Of the remaining 7%, 90% were classified as medium risk, 8% as high risk and 2% as severe risk. A multi-criteria analysis can be used in the future to validate and improve the results. Based on the identification of most affected areas, flood risk mapping can be an important tool in urban planning, definition of flood mitigation measures and response actions.

Keywords: Flooding, Risk Map; Terrain Descriptor, Socioeconomic aspects.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil de declividade dos principais rios da BHRI.	23
Figura 2 – Barragens de contenção de cheias da BHRI.	24
Figura 3 – Cálculo do HAND.	28
Figura 4 – Localização da BHRI.	31
Figura 5 – Manchas de inundação relacionadas ao evento de setembro de 2011 na BHRI.	32
Figura 6 – Metodologia aplicada para identificação do risco de inundação na BHRI. A soma das classificações de perigo, exposição e vulnerabilidade definem o risco de inundação.	36
Figura 7 – Metodologia aplicada para identificação do perigo de inundação na BHRI. .	37
Figura 8 – Metodologia aplicada para identificação da exposição na BHRI.	38
Figura 9 – Metodologia aplicada para identificação da vulnerabilidade na BHRI.	39
Figura 10 – Classificação de risco à inundação. O cálculo é feito somando o valor de pixel atribuído a cada classe dos fatores de risco.	39
Figura 11 – Fluxograma resumo da metodologia aplicada para definição do mapeamento de risco de inundação na BHRI. Em rosa é a parte relativa ao perigo, em amarelo à vulnerabilidade e azul à exposição.	40
Figura 12 – HAND - BHRI.	41
Figura 13 – Classificação binária do HAND para os municípios analisados da BHRI em relação as manchas de inundação observadas nesses municípios.	42
Figura 14 – Mancha de Inundação da Bacia do Itajaí referente ao evento de setembro de 2011 com base na transferência de limiar de corte de inundação de Rio do Sul.	45
Figura 15 – Ajuste da amostra para a distribuição de Gumbel.	46
Figura 16 – Mapa de perigo de inundação da BHRI.	47
Figura 17 – Mapa de vulnerabilidade à inundação da BHRI.	48
Figura 18 – Mapa de exposição à inundação da BHRI.	49
Figura 19 – Mapa de Risco de Inundação da BHRI utilizando descritor de terreno e aspectos socioeconômicos.	50
Figura 20 – Risco de Inundação da BHRI - <i>Zoom</i> dos principais municípios estudados. .	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação binária linear.	34
Tabela 2 – Classificação utilizada para cada fator para determinar o risco de inundação.	39
Tabela 3 – Índices de acerto e ajuste do HAND em relação às manchas observadas na BHRI.	43
Tabela 4 – Índices de acerto para as manchas observadas em Rio do Sul.	44
Tabela 5 – Resumo da amostra.	46
Tabela 6 – Cotas máximas para a distribuição de Gumbel.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BHRI	Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí
C	<i>Correctness Index</i>
CUDA	<i>Compute Unified Device Architecture</i>
DMSP	<i>Defense Meteorological Satellite Program</i>
DNB	<i>day-night-band</i>
F	<i>Fit index</i>
FN	Falsos negativos
FP	Falsos positivos
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i> - Unidade de Processamento Gráfico
HAND	<i>Height Above Nearest Drainage</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
MDE	Modelo Digital de Elevação
NOAA	Administração Nacional Oceânica e Atmosférica
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TauDEM	<i>Terrain Analysis Using Digital Elevation Models</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VIIRS	<i>Visible Infrared Imaging Radiometer Suite</i>
VN	Verdadeiros negativos
VP	Verdadeiros positivos

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Parâmetro de escala
β	Parâmetro de posição
\bar{x}	Média
δ	Desvio Padrão
Le	Radiância

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	Objetivo Geral	22
1.1.2	Objetivos Específicos	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	INUNDAÇÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAJAÍ	23
2.2	MAPEAMENTO DE RISCO DE INUNDAÇÃO	25
2.3	DESCRITORES DE TERRENO COMO INDICADORES DE ÁREAS PROPENSAS À INUNDAÇÃO	26
2.3.1	Height Above Nearest Drainage - HAND	27
2.4	FERRAMENTA DESCRIPTOOLS	28
3	METODOLOGIA	31
3.1	ÁREA DE ESTUDO	31
3.2	MANCHAS DE INUNDAÇÃO E REGISTROS HISTÓRICOS	32
3.3	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO	33
3.4	DESCRIPTOOLS.FLOWHAND	33
3.4.1	Cálculo do HAND	33
3.4.2	Performance do HAND	34
3.4.3	Calibração	35
3.5	ANÁLISE DE EXTREMOS	35
3.6	RISCO DE INUNDAÇÃO	36
4	RESULTADOS	41
4.1	HAND - BACIA DO ITAJAÍ	41
4.2	PERFORMANCE DO HAND	42
4.2.1	Classificação Binária Linear	42
4.2.2	Índices de performance	43
4.3	MANCHA DE INUNDAÇÃO DA BACIA DO ITAJAÍ REFERENTE AO EVENTO DE SETEMBRO DE 2011	44
4.4	RISCO DE INUNDAÇÃO	45
4.4.1	Perigo	45
4.4.2	Vulnerabilidade	48
4.4.3	Exposição	49
4.4.4	Mapeamento de Risco de Inundação	50
5	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

Inundações são um fenômeno global capaz de gerar impactos como perdas humanas, ambientais e materiais em todos os continentes habitados (HOCINI *et al.*, 2021). É provavelmente o desastre natural mais frequente e devastador para a sociedade (TENG *et al.*, 2017). Ao longo da história, houve um esforço constante para identificar, compreender e avaliar eventos de inundação e seus impactos. O mapeamento do risco de inundação tem um papel estratégico nesse contexto e é uma ferramenta importante para a prevenção de inundações e definição de medidas de mitigação de risco (ARRIGHI *et al.*, 2013), sendo necessário considerar de modo conjunto os fatores perigo, exposição e vulnerabilidade (GAIN; HOQUE, 2012).

Mapear e modelar a extensão da inundação com precisão é um desafio porque requer uma representação detalhada, computacionalmente exigente e com dados limitados dos processos hidrológicos e hidráulicos (GAROUSI-NEJAD *et al.*, 2019). Modelos Digitais de Elevação (MDE), especialmente aqueles disponíveis gratuitamente em domínio público como os da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), são uma fonte de dados valiosa e confiável para muitos estudos científicos (PREETY *et al.*, 2022) pois fornecem informações úteis sobre a morfologia de uma superfície de terreno, como a formação da rede de drenagem (ORTEGA; RUEDA, 2010).

Modelos conceituais simples de inundação são uma alternativa potencial para lidar com limitações como requisitos de computação e escassez de dados mais precisos. Um desses modelos conceituais simples de inundação é o *Height Above Nearest Drainage* (HAND). O modelo HAND é um descritor de terreno que calcula a diferença de elevação de cada pixel e seu ponto de drenagem mais próximo (RENNÓ *et al.*, 2008). Afshari *et al.* (2018) mostraram que, embora as previsões de inundação baseadas no HAND possam superestimar a profundidade da inundação, esse método fornece simulações de inundação rápidas e computacionalmente leves.

Em relação ao MDE, o uso de *Graphics Processing Unit* - Unidade de Processamento Gráfico (GPU) apresenta resultados promissores na diminuição de tempo de cálculo de redes de drenagem (ORTEGA; RUEDA, 2010) e acumulação de fluxo. GPU's fornecem desempenho superior por custo total de recursos (preço de *hardware* e uso de energia) (GICHAMO; TARBOTON, 2020). Souza (2021) desenvolveu o pacote em *Python* intitulado *Descriptools* com implementação paralela em GPU e *Compute Unified Device Architecture* (CUDA), que integra rotinas de cálculo de diferentes descritores de terreno, sendo o que resultou em melhor performance foi o HAND. Em suas recomendações, o autor sugeriu que em trabalhos futuros fosse testada a performance do método com manchas reais e em escalas menores.

Devido ao seu extenso histórico de eventos de inundação, optou-se por realizar o estudo na Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí (BHRI) (15.000 km²). As inundações na bacia são relatadas desde a época de sua colonização, em meados de 1850, e a evolução dos desastres vem acompanhando o desenvolvimento econômico da região, principalmente em função do crescimento populacional (FRANK; PINHEIRO, 2003). Somente nos últimos 50 anos foram relatados 39

eventos de inundação que atingiram cidades como Blumenau, Rio do Sul e Gaspar (CASA-GRANDE, 2015). A integração do descritor de terreno HAND associado à análise de extremos determinam o fator perigo, que combinado a vulnerabilidade e exposição (associados a aspectos socioeconômicos), podem representar o risco de inundação na BHRI (SPECKHANN, 2018).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o risco de inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí utilizando descritor de terreno e aspectos socioeconômicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a performance do descritor de terreno HAND no mapeamento de inundação em relação às cheias observadas na Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí;
- Mapear o perigo de inundação da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí utilizando o descritor HAND e análise de extremos;
- Analisar a vulnerabilidade à inundação da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí utilizando IDH e distribuição populacional;
- Analisar a exposição à inundação da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí utilizando luzes noturnas.

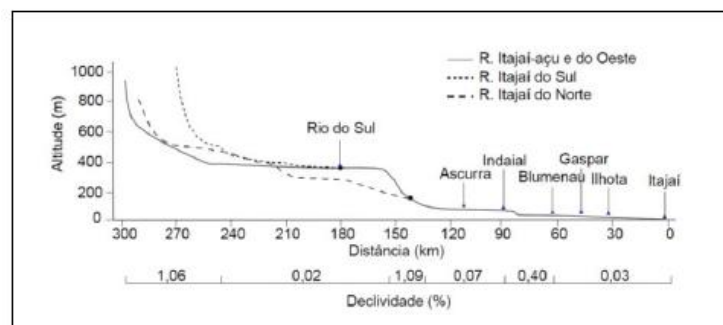
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INUNDAÇÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAJAÍ

A Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí (BHRI) vem passando por recorrentes inundações devido a fatores físicos, como a sua geomorfologia, e outros de cunho social, como uso e ocupação da terra, causando impermeabilização do solo devido ao grande processo de urbanização e atividades agropecuárias (ALVES, 2013). A bacia apresenta várias condições que a tornam suscetível a desastres naturais associados a extremos hidrológicos, tais como a presença de vales encaixados com cotas que variam desde mais de 1000 metros de altitude nas cabeceiras até 20 metros em Blumenau (início do Baixo Itajaí), presença de cambissolos e neossolos associados a formações rochosas, e, também, um histórico de urbanização baseada na ocupação das áreas ribeirinhas ao rio Itajaí-Açu e seus afluentes. Aproximadamente 70% dos municípios da bacia têm áreas construídas nas proximidades do curso principal do rio Itajaí-Açu, ou seus afluentes (CASAGRANDE, 2015).

A declividade dos cursos d'água que compõem a rede de drenagem contribui de forma significativa para a ocorrência de inundações na bacia, com destaque para o trecho que se estende do centro urbano de Blumenau até a foz do rio Itajaí-Açu, que por sua vez compreende os municípios de Itajaí e Navegantes, onde se tem baixas declividades (ALVES, 2013). A Figura 1 apresenta o perfil vertical dos principais rios da região, com declividades que variam, em média, entre 1,06% nas cabeceiras e 0,03% na parte mais baixa (SCHETTINI, 2002).

Figura 1 – Perfil de declividade dos principais rios da BHRI.



Fonte: Schettini (2002).

Com o objetivo de conter as cheias na região, foram implantadas algumas medidas estruturais ao longo dos anos. Por exemplo, três barragens tiveram o início da sua construção na década de 60: a Barragem Oeste (Taió), concluída em 1973, Barragem Sul (Ituporanga), finalizada em 1975 e a Barragem Norte (José Boiteux), concluída em 1992 (Figura 2). Essas barragens têm mostrado capacidade para atenuar os picos das ondas de cheias em eventos de menor período de retorno, mas não para evitar eventos de grande magnitude (CASAGRANDE, 2015).

Figura 2 – Barragens de contenção de cheias da BHRI.



Fonte: CASAGRANDE (2015).

O Plano Integrado de Prevenção e Mitigação de Desastres Naturais na BHRI foi concebido pelo governo do estado de Santa Catarina em setembro de 2009. As atividades relacionadas ao Sistema de Previsão e Alerta de Cheias na Bacia do Rio Itajaí são desenvolvidas pelas instituições concernentes dependendo da magnitude do desastre natural (JICA, 2011).

Entre os desastres ocorridos na região, tem-se o de setembro de 2011. No município de Rio do Sul, a cota de cheia do rio atingiu 13 metros, 15 mil pessoas foram desalojadas, sendo que 3.000 foram desabrigadas. Devido à magnitude do evento, todos os bombeiros da 3ª Companhia foram acionados e que a população não foi avisada a tempo e também porque não acreditou que a inundação iria acontecer realmente (SILVA; SOUZA, 2016).

A medida que os desastres tornaram-se mais frequentes na bacia, diversos levantamentos foram realizados. O levantamento das cotas-enchente do município de Blumenau foi feito para a Defesa Civil da Prefeitura Municipal após a inundação de setembro de 2011, quando o nível máximo do Rio Itajaí-Açu, na estação fluviométrica de Blumenau, atingiu o valor de 13 metros. O evento causou inundação no centro e em muitos bairros de Blumenau. Para este levantamento, três equipes de alunos do curso de Engenharia Civil da FURB percorreram as regiões que foram inundadas e levantaram 1851 pontos de cotas-enchente através de equipamentos topográficos e em base nas marcas deixadas pela água. (CORDERO; SALVADOR; REFOSCO, 2013).

Já no município de Brusque, o levantamento foi realizado baseando-se nas marcas da inundação ocorrida também em 2011, em todas as esquinas e pontos baixos da área urbana do município, até a cota de cheia de 15 metros. Para tanto, as três equipes de alunos do curso de Engenharia Civil também da FURB, percorreram todas as ruas da cidade dentro das delimitações do projeto com equipamentos topográficos, e uma equipe de engenheiros e bolsistas processaram os dados coletados em laboratório para desenvolvimento de uma planilha de referência e a cartainundação com traçados das manchas de cheia. Os produtos resultantes do projeto são fornecidos

pela Defesa Civil de Brusque em seu *site*, disponível a todos os moradores como uma maneira de prever se determinada rua ou edificação vai sofrer danos com as inundações recorrentes no município, sendo parte das medidas de controle não estruturais implementadas pela Defesa Civil local (LUCONI *et al.*, 2015).

2.2 MAPEAMENTO DE RISCO DE INUNDAÇÃO

O risco de inundação é o resultado de eventos hidrológicos extremos em combinação com atividades humanas (GAIN; HOQUE, 2012), sendo importante considerar de modo conjunto o perigo, a exposição e a vulnerabilidade. Segundo a UNISDR (2015), os três fatores que definem o risco podem ser descritos como: a) perigo, que traduz a probabilidade de ocorrência de um processo potencialmente danoso com uma determinada intensidade ou magnitude; b) exposição, que corresponde ao conjunto de valores (bens, pessoas) sujeitos ou expostos à inundação; c) vulnerabilidade, que traduz a sensibilidade ou capacidade adaptativa de um local que foi inundado.

O conceito de vulnerabilidade não é unânime. Uma das definições é que a vulnerabilidade represente a capacidade de resposta a eventos de inundação (MERZ *et al.*, 2015). O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) é uma unidade de medida utilizada para aferir o grau de desenvolvimento de uma determinada sociedade nos quesitos de educação, saúde e renda, podendo ser um aspecto de representação da vulnerabilidade. Alguns indicadores de vulnerabilidade podem ser a ausência de estruturas de proteção a enchentes, garantia econômica de bens e vidas suscetíveis à inundação (ELSHORBAGY *et al.*, 2017). Segundo ISDR (2002), pela definição da vulnerabilidade, é possível gerenciar o risco com o intuito de minimizar as consequências adversas de um desastre natural. Do ponto de vista de aplicação, o mapa de vulnerabilidade gerado pode servir de instrumento para eleger áreas prioritárias de investimentos ou direcionar ações e programas de governo de planejamento e gestão ambiental, assim como a implementação de políticas públicas no combate aos fatores naturais e antrópicos que provocam a inundação.

A exposição representa os elementos que estão em risco durante os eventos de inundação, como as pessoas e os bens envolvidos em uma determinada localidade. Na análise da exposição almeja-se responder “quem” ou “o quê” será afetado pelas inundações (SPECKHANN, 2018). Neste contexto, exposição e vulnerabilidade estão ligadas diretamente aos aspectos socioeconômicos de uma região. Uma possibilidade de estimativa da exposição é usando luzes noturnas. Addison e Stewart (2015) encontraram correlações positivas entre luzes noturnas e diversas variáveis econômicas. Essas correlações são baseadas em dados medidos em níveis, com um corte transversal de observações dentro de um único período de tempo entre países ou outras unidades geográficas. Os resultados sugerem que as luzes noturnas podem representar algumas variáveis econômicas, especialmente em áreas ou épocas nas quais os dados são escassos (ADDISON; STEWART, 2015).

De acordo com Moel *et al.* (2009), o mapa de perigo de inundação contém informações sobre a probabilidade e magnitude de um evento, enquanto o mapa de risco combina informações adicionais sobre as consequências (danos econômicos, pessoas afetadas). A junção da tomada de decisão multicritério com Sistema de Informação Geográfica (SIG) permite integrar os três componentes da avaliação de risco (perigo, exposição e vulnerabilidade), em que os aspectos sociais, econômicos e vulnerabilidades ambientais podem ser considerados (RINCÓN; KHAN; ARMENAKIS, 2018). Uma vantagem dessa metodologia é a possibilidade de obter um mapa de risco de inundação confiável com um investimento monetário e de tempo relativamente baixos para apoiar as partes interessadas a identificar as áreas que precisam de uma avaliação mais detalhada.

As ferramentas SIG utilizadas pela cartografia permitem auxiliar a tomada de decisão, desenvolvendo a gestão de determinado território, através de conjunto de técnicas, dados, estruturas e métodos. Além disso, possibilitam distinguir as áreas de risco e estabelecer estratégias para o seu gerenciamento (MGHIRBI *et al.*, 2018). A cartografia e a identificação das áreas em que o risco se manifesta constituem a base de uma política de prevenção de riscos de inundação.

Em relação aos tipos de mapeamento de inundação, existem muitos modelos de aplicação para mapeamento de inundação na literatura, como o *Hydrologic Engineering Center-River Analysis System* (HEC-RAS), com funcionalidade de simulação de fluxo 1D e 2D, MIKE FLOOD e modelos de baixa complexidade como o HAND (AFSHARI *et al.*, 2018). Em seu trabalho, Afshari *et al.* (2018) compararam a mancha de inundação gerada a partir do modelo HEC-RAS com a gerada pelo modelo HAND em escala de bacia, evidenciando uma semelhança na representação entre as mesmas. Isso mostra que modelos simplificados como o HAND podem ser uma alternativa na ausência de informações e dados mais detalhados para determinar inundações.

2.3 DESCRITORES DE TERRENO COMO INDICADORES DE ÁREAS PROPENSAS À INUNDAÇÃO

Descritores de terreno são modelos que permitem relacionar as características da bacia e topografia com áreas suscetíveis à inundação (MANFREDA; SALVATORE *et al.*, 2011). A base para qualquer descritor de terreno é a elevação, representada pelo Modelo Digital de Elevação (MDE). Entretanto, cada descritor utiliza diferentes informações de entrada em seus cálculos. Declividade, índice topográfico, distância horizontal até a rede de drenagem e HAND são exemplos de descritores de terreno. O pré-processamento do MDE permite obter dois conjuntos de informações muito utilizados por descritores: a direção de fluxo e a acumulação de fluxo. Nesse processo, o MDE passa por uma correção de consistência hidrológica, garantindo um caminho hidrológico até os limites da matriz.

Degiorgis *et al.* (2012) estudaram a relação entre diversos descritores geomorfológicos e áreas propensas a inundar, indicando que a topografia e as características físicas internas da região influenciam na performance dos descritores. Samela, Troy e Manfreda (2017) compara-

ram as performances de diferentes descritores em sub-bacias com características topográficas distintas, demonstrando que descritores que se relacionam melhor com regiões montanhosas são diferentes dos que representam melhor bacias mais planas.

Um limiar de classificação que aproxima um descritor de um mapa de inundação de teste (menor escala) pode ser utilizado para mapear locais que não possuem um mapa de inundação em regiões com características geomorfológicas semelhantes. Entretanto, a nível de bacia, os descritores são mais capazes de aproximar e relacionar a superfície com inundações. Assim, o aumento da área de estudo junta regiões com características diferentes, de modo que um descritor sozinho não é capaz de apresentar uma classificação aceitável para toda a área (SOUZA, 2021). Manfreda *et al.* (2015) compararam a performance de descritores em duas escalas diferentes e constataram que quanto maior a área, mais distintas as características físicas e maior a chance de obterem-se células erroneamente classificadas.

2.3.1 Height Above Nearest Drainage - HAND

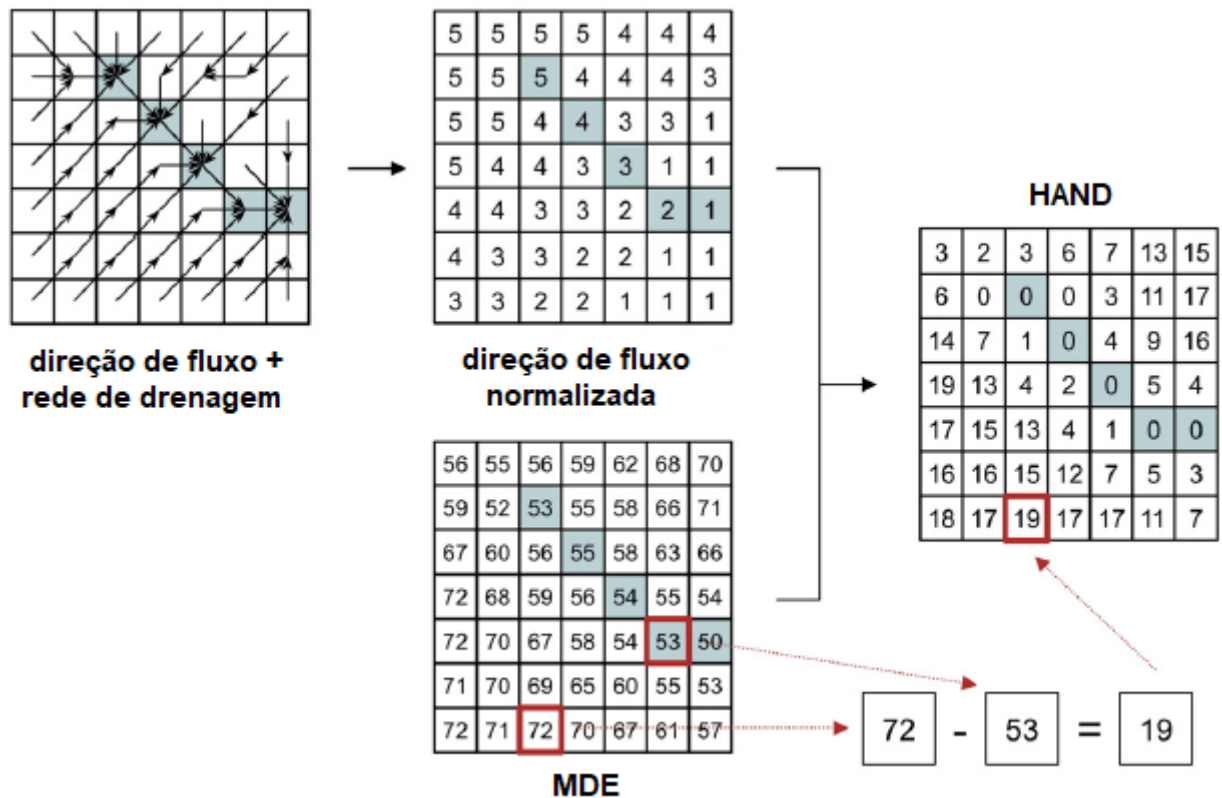
O HAND é um modelo que normaliza o MDE, levando em consideração a diferença de altitude do terreno em relação à altitude da rede de drenagem mais próxima de cada pixel (RENNÓ *et al.*, 2008). Em outras palavras, a estimativa do HAND é a altura para qual a célula estará imersa e a extensão da inundação de um determinado nível de água pode ser controlada escolhendo todas as células com um HAND menor ou igual a esse nível. Na Figura 3 apresenta-se o cálculo do HAND.

O HAND possui como parâmetros de entrada o MDE corrigido nas áreas com depressões e discontinuidades, a direção de fluxo e uma rede de drenagem. A sua relevância para o campo da modelagem de inundações tem sido demonstrada na literatura (NOBRE *et al.*, 2015), sendo um dos melhores descritores na identificação de áreas de inundação. Estudos no Sul do Brasil mostraram uma eficiência superior a 90% na correspondência com eventos passados (NOBRE *et al.*, 2015) (SENGER, 2021).

Uma das formas de determinar a performance dos descritores de terreno é por índices de acerto e classificadores binários, propostos inicialmente por Degiorgis *et al.* (2012). Posteriormente, Manfreda *et al.* (2015) e Samela *et al.* (2016), compararam a performance no mapeamento de diferentes descritores utilizando classificadores binários, e constataram que o HAND é capaz de mapear áreas de inundação com precisão em resoluções moderadas como 30 e 90 metros.

A difusão e aplicabilidade do modelo em áreas de inundações aumentou nos últimos anos. Donchyts (2016) gerou o HAND global e disponibilizou na plataforma *Google Earth Engine* (GEE) na resolução de 30 m. Posteriormente, a Cooperação em Tecnologias para Análises Hidrológicas em Escala Nacional desenvolveu o aplicativo de mapeamento de áreas inundadas usando o modelo HAND em escala global e o GEE, que pode ser acessado pelo link <<https://leolapelt.users.earthengine.app/view/manchahandiphana>>.

Figura 3 – Cálculo do HAND.



Fonte: Adaptado de Rennó (2008).

Além disso, recentemente foi desenvolvida uma ferramenta personalizada no ArcGIS Pro chamada CERC-HAND-D que pode gerar uma curva chave utilizando o HAND e a vazão (SCRIVEN; MCGRATH; STEFANAKIS, 2021). Atualmente, o CERC-HAND-D funciona apenas em locais do Canadá pois foi projetado para trabalhar com dados geoespaciais públicos fornecidos pelo governo e o uso de dados alternativos pode gerar erros.

2.4 FERRAMENTA DESCRIPTOOLS

A ferramenta Descriptools foi desenvolvida por Souza (2021) em linguagem de programação *Python*. O pacote inclui o cálculo de diferentes descritores como declividade, índice topográfico e distância horizontal até a rede mais próxima. O descritor de terreno que resultou em melhor performance foi o HAND (SOUZA, 2021), determinado pela rotina `descriptools.flowhand`.

As implementações realizadas na ferramenta dependem principalmente do pacote `Numba` e a plataforma de computação paralela para placas gráficas utilizada foi o `NVIDIA CUDA`. Os códigos estão disponíveis no `GitHub`, em <https://github.com/JVBSouza/descriptools>. Uma das grandes diferenças entre as implementações paralelas e sequenciais é o método utilizado pela GPU para acessar as células das matrizes. A implementação sequencial utiliza um endereça-

mento bidimensional enquanto a paralela utiliza o endereçamento unidimensional. A utilização do endereçamento unidimensional facilita a programação para GPU pela forma que o CUDA lida com o endereçamento das *threads*, correspondendo o índice da localização da matriz com a *thread*. O endereçamento unidimensional também facilita os cálculos que utilizam alguma célula do rio, utilizando apenas um valor de endereço em vez de linha e coluna (SOUZA, 2021).

Uma das maiores limitações encontradas para a implementação dos algoritmos paralelos em GPU é a memória global disponível para a placa gráfica. Essa memória limita a dimensão máxima das matrizes que podem ser simuladas. Cada descritor depende de diferentes dados de entrada e possuem tipos de dados diferentes, o que modifica a memória ocupada e modifica as dimensões máximas permitidas para a GPU. Dessa forma, Souza (2021) adotou duas considerações para lidar com a memória disponível: escolher os tipos de variáveis que menos ocupam espaço (como resoluções menores) e implementar estratégias de divisões de matrizes.

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí (BHRI) está localizada no estado de Santa Catarina e possui uma área de aproximadamente 15.000 km², sendo a maior bacia do estado. Os principais rios da bacia são o Rio Itajaí do Oeste, Rio Benedito, Rio Itajaí do Sul, Rio Itajaí-Mirim e Rio Itajaí-açu, conforme apresentado na Figura 4.

O clima da bacia, segundo classificação de Köppen, é considerado Cfa - subtropical úmido e verão quente. A precipitação média anual é de 1560 mm e o índice mais alto foi o do ano de 1983, correspondente à 2635 mm (JICA, 2011). Cerca de 1,5 milhão de pessoas vivem na bacia, sendo Blumenau e Itajaí os municípios mais populosos (IBGE, 2010).

Figura 4 – Localização da BHRI.



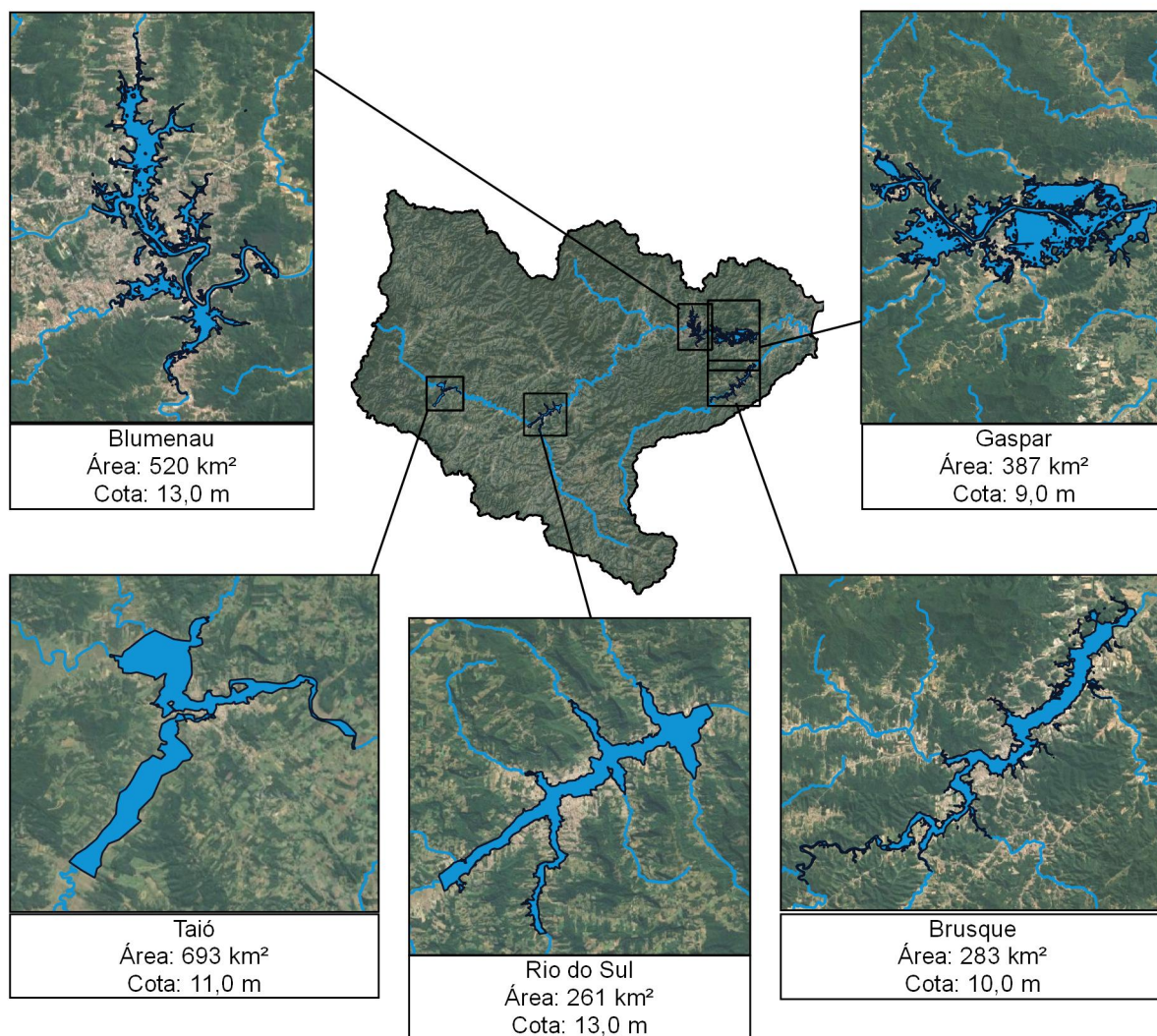
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.2 MANCHAS DE INUNDAÇÃO E REGISTROS HISTÓRICOS

A BHRI possui um histórico de eventos de inundação, tal como o evento de setembro de 2011. Entre os municípios atingidos estão Blumenau, Rio do Sul, Brusque, Gaspar e Taió. Na Figura 5 é possível observar as manchas de inundação geradas para esses municípios e as cotas máximas atingidas durante o evento de setembro de 2011 a partir de levantamentos de campo realizados e disponibilizados pelas Defesas Civas de cada município.

No município de Blumenau, por exemplo, o trabalho de campo consistiu em levantar as cotas-enchente em cada esquina de rua e outros pontos adicionais, como os mais baixos de cada trecho. O trabalho foi baseado nas marcas que ficaram nas edificações da cidade devido à inundação (CORDERO; SALVADOR; REFOSCO, 2013). As manchas de inundação foram utilizadas como base comparativa para determinar a performance do HAND.

Figura 5 – Manchas de inundação relacionadas ao evento de setembro de 2011 na BHRI.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.3 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

Foi utilizado o MDE da SRTM 3 *arc-second* com uma resolução de 90 m disponível gratuitamente pelo *United States Geological Survey* (USGS). Existem MDE's com resoluções maiores para a área estudada, tal como o MDE SRTM 1 *arc-second* de 30 m disponível para o Brasil pela USGS, e como o de resolução de 1 m disponibilizado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável para o estado de Santa Catarina. Entretanto, a placa de vídeo utilizada para o cálculo do *descriptools.flowhand* (NVIDIA GeForce MX110 de memória de vídeo de 2010 MB) não possui memória global disponível suficiente para rodar resoluções superiores para uma área como a da BHRI. Dessa forma, não foi utilizado MDE de maior resolução devido a limitação computacional existente, atentando-se para o fato de que a resolução de 90 m possui um erro vertical elevado, o que pode implicar na performance no mapeamento de inundação, principalmente em regiões mais planas.

Por outro lado, a performance satisfatória de mapeamento de inundações utilizando MDE's de baixa resolução tem sido um estímulo para o desenvolvimento de técnicas que se baseiam em informações de terreno para identificar áreas propensas à inundação (SPECKHANN, 2018). Além disso, Souza (2021) e Speckhann (2018) utilizaram diferentes resoluções de MDE no cálculo de descritores de terreno e constataram que um refinamento do *grid* não implicaria necessariamente em maior acurácia na representação da inundação, o que justificaria o uso de um MDE de menor resolução que possui, conseqüentemente, menor exigência computacional.

O MDE passou por um refinamento para eliminar possíveis falhas, realizado com a rotina *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models* (TauDEM), também utilizada para determinar a direção de fluxo e acumulação de fluxo.

3.4 DESCRIPTOOLS.FLOWHAND

A rotina *descriptools.flowhand* é parte do pacote *Descriptools*, disponíveis no GitHub, em <<https://github.com/JVBSouza/descriptools>>.

3.4.1 Cálculo do HAND

Para a implementação do HAND, os cálculos dependem do caminho hidrológico que pode ser interrompido pela divisão de matrizes. O caminho entre a célula atual e a célula do rio é percorrido, sendo que durante a função de divisão de matrizes, o trajeto é interrompido e a implementação paralela não poderá finalizar o caminho até a célula do rio. Assim, para permitir a divisão, são utilizados *arrays* de fronteira, que possuem os respectivos valores de distância horizontal até a rede de drenagem e os índices de localização da célula do rio (SOUZA, 2021).

Os *arrays* de fronteira são calculados pela implementação sequencial apenas em colunas e linhas específicas localizadas entre as submatrizes. Esses *arrays* são enviados para a memória da GPU junto com a submatriz que se deseja calcular o descritor. Durante o cálculo dos descritores na GPU, caso alguma célula tenha uma direção de fluxo direcionada para fora do

limite da submatriz, é usado então o valor de fronteira correspondente para o cálculo do descritor (SOUZA, 2021).

3.4.2 Performance do HAND

A avaliação da performance do HAND é calculada a partir de classificação binária linear. São gerados dois mapas binários, o primeiro em relação à mancha obtida pelo descritor (1 inundado e 0 não inundado) e o segundo em relação a mancha de inundação observada (2 inundado e 0 não inundado). A soma dos dois mapas resulta em um mapa no qual cada pixel classificado é utilizado como indicador da acurácia do método, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação binária linear.

HAND indica inundação	Observado indica inundação	Classificação inundação final
1-Sim	2-Sim	3 - Verdadeiros positivos (VP)
0-Não	2-Sim	2 - Falsos negativos (FN)
1-Sim	0-Não	1 - Falsos positivos (FP)
0-Não	0-Não	0 - Verdadeiros negativos (VN)

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A partir dessas classificações, calculam-se métricas de desempenho do modelo em aproximar à mancha de inundação observada. Foram utilizadas duas métricas: índice de acerto (*C*, *Correctness Index*), e o índice de ajuste (*F*, *Fit index*) (SOUZA, 2021).

Os índices de acerto e de ajuste podem ser utilizados em conjunto para servir de indicação da sobreposição das áreas de inundação simuladas e observadas. O índice de acerto representa a capacidade do modelo em classificar corretamente as células de inundação, não levando em conta os falsos positivos. Enquanto o índice de ajuste representa a proporção de células corretamente classificadas em relação as células erroneamente classificadas. As equações 1 e 2 apresentam o cálculo dos índices de acerto e ajuste (BATES; DE ROO, 2000; SANGWAN; MERWADE, 2015).

$$C = \frac{VP}{VP + FN} \quad (1)$$

$$F = \frac{VP}{VP + FP + FN} \quad (2)$$

O índice de ajuste é utilizado para determinar a escolha do melhor limiar de corte durante a calibração. A calibração do índice de ajuste permite encontrar o limiar de corte que apresente uma maior presença de verdadeiros positivos e minimize a presença de erros de falsos positivos e falsos negativos. Esse índice não considera a quantidade de verdadeiros negativos, removendo a sua influência sobre o resultado da performance (SOUZA, 2021).

3.4.3 Calibração

O limiar de classificação ótimo é o valor que apresentar a melhor performance em relação às células corretamente classificadas. Esse limiar ótimo é determinado pelo processo de calibração. Na etapa da calibração vários limiares normalizados, entre 0 e 1, são testados iterativamente para encontrar a menor razão de acertos para erros. Para isso, é utilizado o índice de ajuste (SOUZA, 2021).

Neste trabalho, será utilizado o limiar de corte do município que apresentar o melhor índice de ajuste para gerar a inundação da BHRI entre os municípios de Blumenau, Gaspar, Taió, Rio do Sul e Brusque.

Além da calibração pelo limiar de corte, o HAND pode também ser calibrado em função do limiar de início de rede de drenagem. Foi adotado o melhor valor encontrado por Souza (2021) para a Bacia do Itajaí com MDE de 90 m, sendo este valor 30 km².

3.5 ANÁLISE DE EXTREMOS

O cálculo do tempo de retorno das cotas de inundação foi realizado após a calibração a partir de uma estação localizada no município que obteve a melhor performance do HAND. Foi realizada uma por análise de extremos utilizando dados de cotas máximas anuais. Os dados foram obtidos pela plataforma Hidroweb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Foram testadas diferentes distribuições para verificação da que apresentava melhor ajuste, conforme Apêndice B, sendo a Gumbel a escolhida pelo menor desvio e maior R². Além disso, essa distribuição é uma das mais empregadas, sendo a utilização justificada pela simplicidade na aplicação e por apresentar resultados satisfatórios de aderência aos dados de vazões máximas (NAGHETTINI; PINTO, 2007). As probabilidades empíricas associadas a cada elemento da série de vazões máximas, usualmente denominadas de posições de plotagem ou probabilidade empírica, foram definidas conforme recomendado por Cunnane (1989). A distribuição de Gumbel é representada pela Equação 3, na qual o valor de α representa o parâmetro de escala, e β o parâmetro de posição, funções da média \bar{x} e desvio padrão δ .

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{x - \beta}{\alpha} - \exp \left(-\frac{x - \beta}{\alpha} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\beta = \bar{x} - 0,45\delta \quad (4)$$

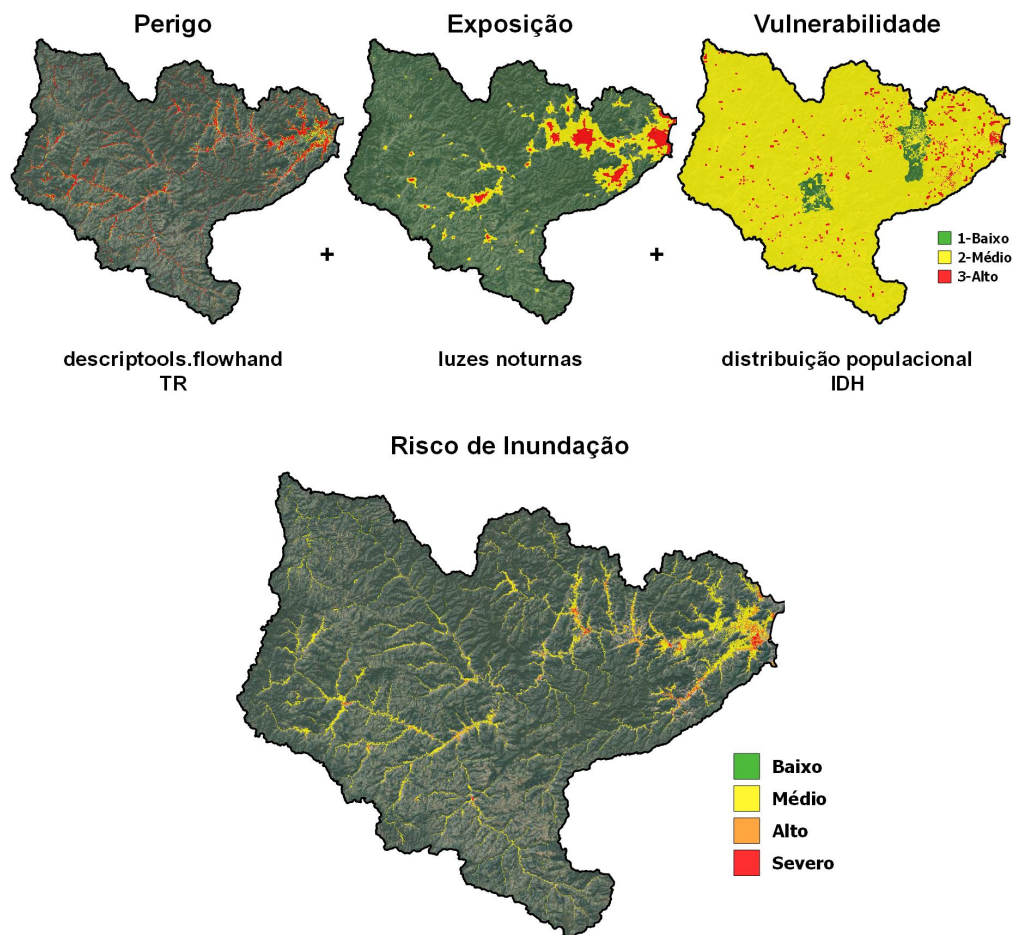
$$\alpha = \frac{\delta}{1,283} \quad (5)$$

3.6 RISCO DE INUNDAÇÃO

O risco de inundação é a combinação dos fatores perigo, exposição e vulnerabilidade (IPCC, 2012; ELSHORBAGY *et al.*, 2017). Neste trabalho, foram adotadas métricas para cada um desses fatores, que foram combinados por meio de uma classificação qualitativa, de forma semelhante ao realizado por Speckhann (2018).

O fator perigo foi determinado a partir de diferentes cortes do HAND associados a diferentes tempos de retorno (TR) após a calibração (verificação de qual município obteve a melhor performance do HAND), o fator exposição foi determinado por imagens de luzes noturnas e a vulnerabilidade pela combinação do IDH e da distribuição populacional (aspectos socioeconômicos), conforme Figura 6.

Figura 6 – Metodologia aplicada para identificação do risco de inundação na BHRI. A soma das classificações de perigo, exposição e vulnerabilidade definem o risco de inundação.

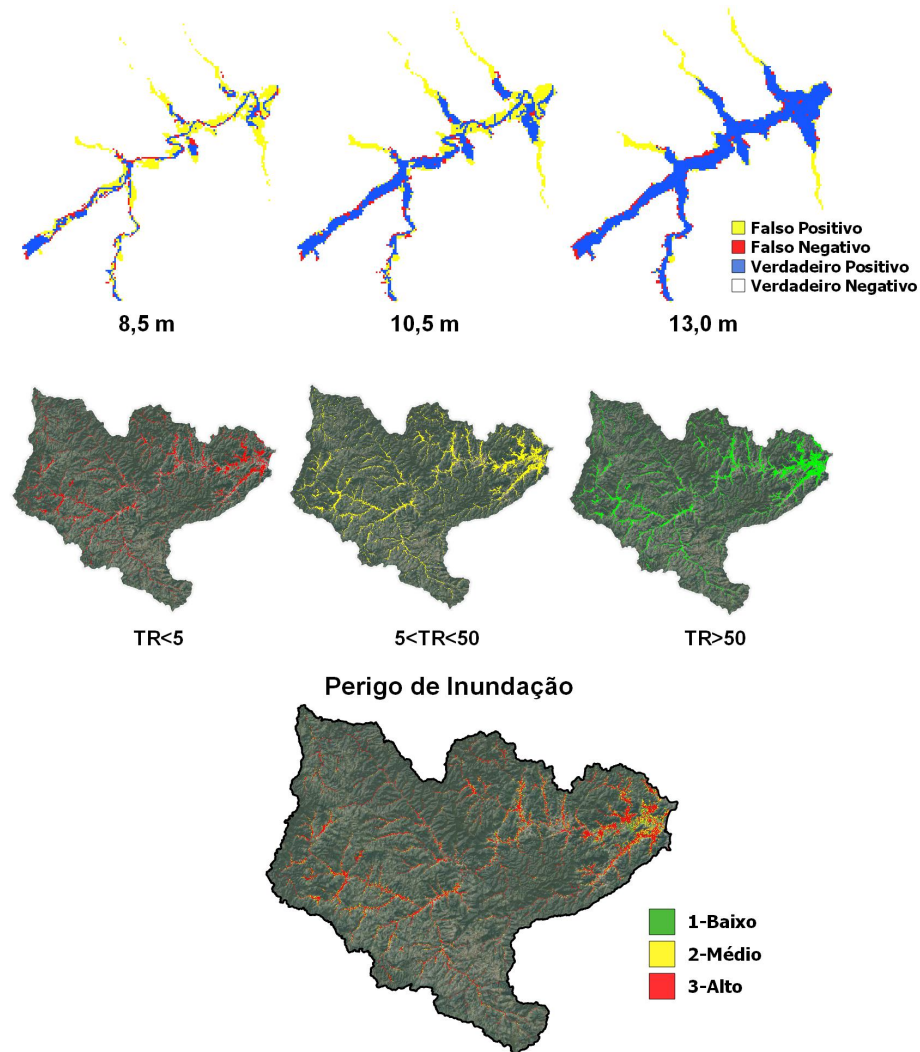


Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Uma vez determinado o município de melhor ajuste utilizando o `descriptools.flowhand` e as cotas-máximas para determinar o TR associado à mancha de inundação gerada, foram utilizadas cotas de inundação com recorrências menores (8,5 e 10,5 metros) para classificar o perigo, já que para a elaboração do mapa de risco de inundação, as áreas estudadas foram

classificadas com alto perigo com TR até 5 anos, médio perigo com TR entre 5 e 50 anos e baixo perigo com TR superior a 50 anos. A metodologia adotada pode ser observada na Figura 7 e foi adaptada de Speckhann (2018). Percebe-se que quanto maior o TR, maior o alcance da inundação e menor o perigo, visto que nesses locais são menos frequentemente inundados.

Figura 7 – Metodologia aplicada para identificação do perigo de inundação na BHRI.

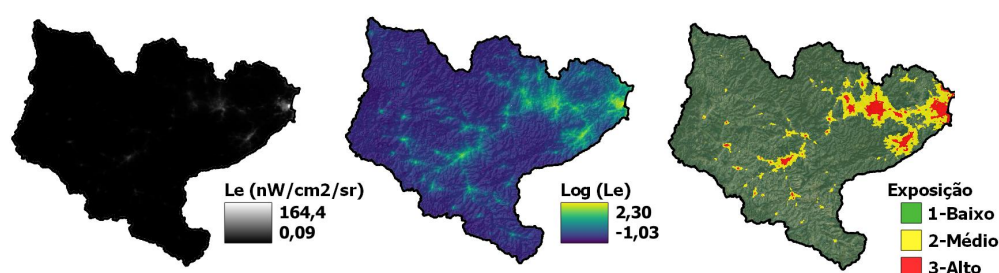


Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para o fator exposição foram utilizadas imagens de luzes noturnas disponibilizadas pela Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA) de resolução de 15 *arc-seconds* obtido pela plataforma GEE datado de dezembro de 2021. Apesar da resolução original possuir aproximadamente 500 m de resolução, foi feito o *download* do *raster* interpolado de pixel 120 m. A imagem representa a composição média mensal de radiância (L_e) utilizando as luzes noturnas - *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) - day-night-band (DNB) - Composites Version 1*. Foram consideradas baixa exposição valores de radiância de até 2 nW/cm²/sr, média exposição para valores de radiância entre 2 e 10 nW/cm²/sr e alta exposição valores de radiância superiores a 10 nW/cm²/sr. A Figura 8 mostra a metodologia adotada para definição da exposição, na qual foi feito o *Log* da radiância para melhor visualização dos dados.

Speckhann (2018) utilizou imagens de luzes noturnas provenientes da *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP). Entretanto, imagens do tipo VIIRS mostraram maior precisão radiométrica, resolução espacial mais fina e maior qualidade geométrica. Além disso, os dados radiométricos são mais confiáveis devido ao processo de calibração que garante nenhum efeito de saturação à noite. Com os dados do VIIRS, pode-se determinar quantitativamente a luz noturna regional em unidades de radiância e associar esse dado com parâmetros socioeconômicos (JING *et al.*, 2015).

Figura 8 – Metodologia aplicada para identificação da exposição na BHRI.



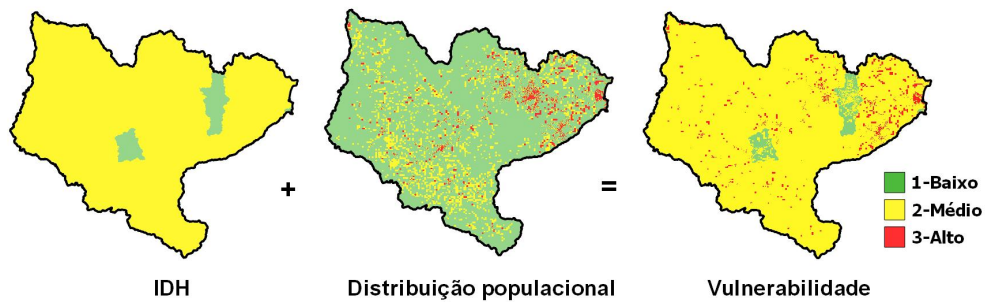
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Já para determinar o fator vulnerabilidade, foram utilizados valores de IDH e distribuição populacional de acordo com o Censo Demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2010. Os valores de IDH estão disponíveis para cada município, já a distribuição populacional possui pixel de resolução variável, em áreas urbanas apresentam tamanho de 200 m e em localidades rurais chegam a 1 km. Vale ressaltar que o *download* dos dados foi feito em formato *shapefile* e foram convertidos em *raster*. Esses fatores foram combinados para determinar a vulnerabilidade. Considerou-se o IDH como fator de vulnerabilidade baixo quando superior a 0,8, médio entre 0,5 e 0,8 e alto para valores abaixo de 0,5, de acordo com PNUD (2017). Em relação aos dados populacionais, foi adotada a mesma faixa de classificação que Speckhann (2018). As localidades com valores até 20 habitantes por pixel foram classificadas como baixa presença de indivíduos, localidades com valores entre 20 e 60 habitantes foram classificadas como média ocupação, e espaços com presença superior a 60 habitantes foram categorizados como alta ocupação.

A Figura 9 apresenta a metodologia utilizada para definição do fator vulnerabilidade, que indica também que nenhum município da bacia possui IDH baixo (nenhum município com fator alto). O valor final foi a média aritmética dos dois parâmetros adotados (IDH e distribuição populacional). Por fim, atribuíram-se valores de 1, 2 e 3 para cada uma das categorias, conforme Tabela 2. A classificação de risco de inundação foi elaborada atribuindo diferentes pesos - baixo, médio, alto e severo (Figura 10), utilizando a classificação apresentada na Tabela 2. Percebe-se que ao somar a classe dos três parâmetros, surge uma nova categoria (risco severo), atribuído

àquelas células que possuem os três fatores de risco classificados como "alto". A ideia central da metodologia de risco está em somar a classe dos três fatores (para cada fator, há pixel com valor 1, 2 e 3) que definem o risco de inundação. As operações foram realizadas pelo *Raster Calculator* no software *QGIS* e a metodologia seguiu o realizado por (SPECKHANN, 2018).

Figura 9 – Metodologia aplicada para identificação da vulnerabilidade na BHRI.



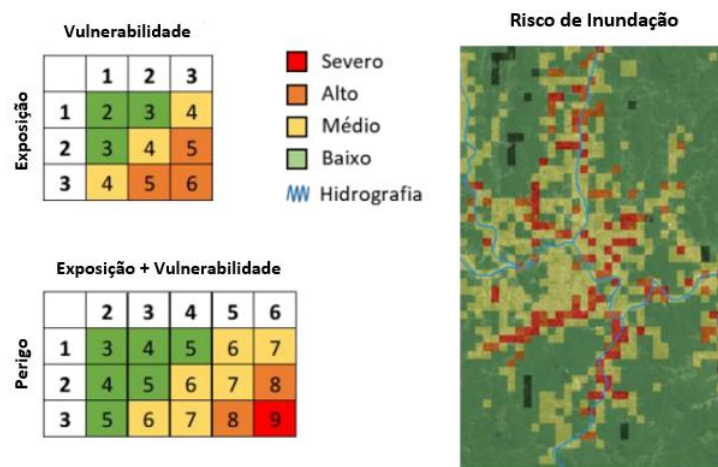
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Tabela 2 – Classificação utilizada para cada fator para determinar o risco de inundação.

Perigo	Vulnerabilidade	Exposição	Classe	Classificação
TR > 50	hab < 20 / IDH > 0,8	Le < 2	1	Baixo
5 < TR < 50	20 < hab < 60 / 0,5 < IDH < 0,8	2 < Le < 10	2	Médio
TR < 5	hab > 60 / IDH < 0,5	Le > 10	3	Alto

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

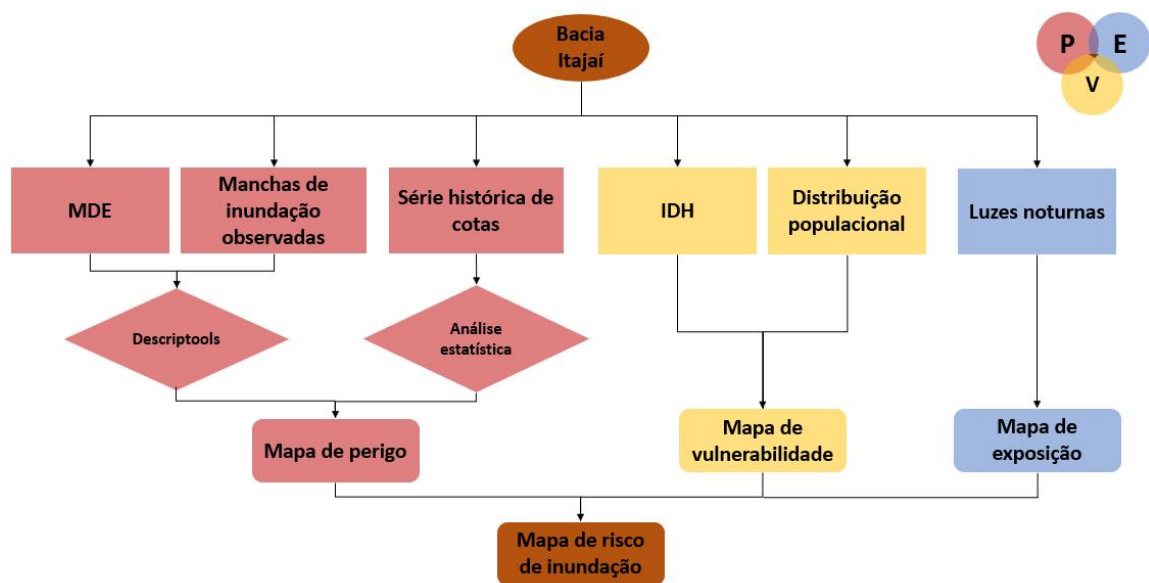
Figura 10 – Classificação de risco à inundação. O cálculo é feito somando o valor de pixel atribuído a cada classe dos fatores de risco.



Fonte: Adaptado de Speckhann (2018).

Na Figura 11 é possível observar o fluxograma resumo da metodologia. De maneira geral, para o mapeamento do perigo de inundação foram utilizados como dados primários o MDE corrigido e seus subprodutos (direção e acumulação de fluxo), inseridos na ferramenta Descriptools para cálculo do descritor de terreno HAND. A performance foi calculada utilizando também o Descriptools a partir de manchas de inundação observadas na bacia, sendo selecionado aquele que obteve melhor performance do método. Foi realizada uma análise estatística com a série histórica de cotas e, posteriormente, foram transferidos diferentes limiares de corte do município para a bacia de modo a obter a classificação e mapeamento do perigo. Já o mapa de vulnerabilidade foi classificado pela combinação do IDH, disponível por município, e distribuição populacional, pixel-pixel. Finalmente, as luzes noturnas foram o dado de entrada para classificação da exposição. A soma das classificações de cada célula dos três mapas (perigo, vulnerabilidade e exposição) definem o mapeamento de risco de inundação na BHRI utilizando descritor de terreno e aspectos socioeconômicos.

Figura 11 – Fluxograma resumo da metodologia aplicada para definição do mapeamento de risco de inundação na BHRI. Em rosa é a parte relativa ao perigo, em amarelo à vulnerabilidade e azul à exposição.



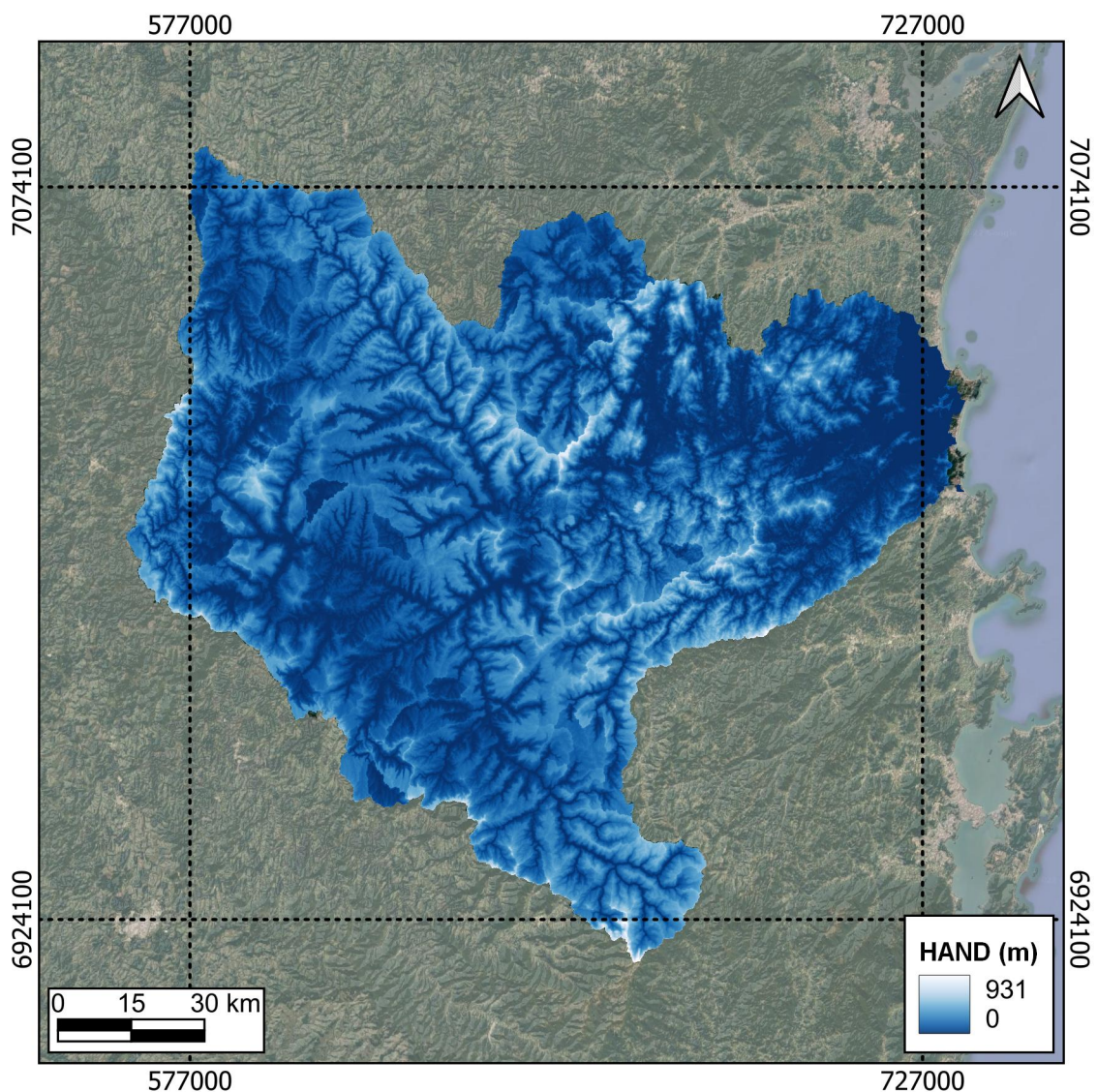
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4 RESULTADOS

4.1 HAND - BACIA DO ITAJAÍ

Inicialmente, foi gerado o HAND para a Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí utilizando o `descriptools.flowhand` com MDE de 90 m. Como o HAND realiza uma normalização da topografia em relação à rede de drenagem, destacam-se algumas características que não eram possíveis anteriormente. Analisando o mapa, é possível observar que o HAND demonstra a rede hidrográfica e os locais mais propensos a inundarem (cor mais escura) e destaca as regiões mais elevadas (cor clara). Além disso, observou-se locais de baixa variação de elevação, como próximo da foz do Rio Itajaí. Destaca-se que como foi utilizado um MDE de resolução 90 m, ocorre a suavização do relevo, o que pode implicar no aumento de falsos positivos (superestimação da inundação) em áreas mais planas.

Figura 12 – HAND - BHRI.



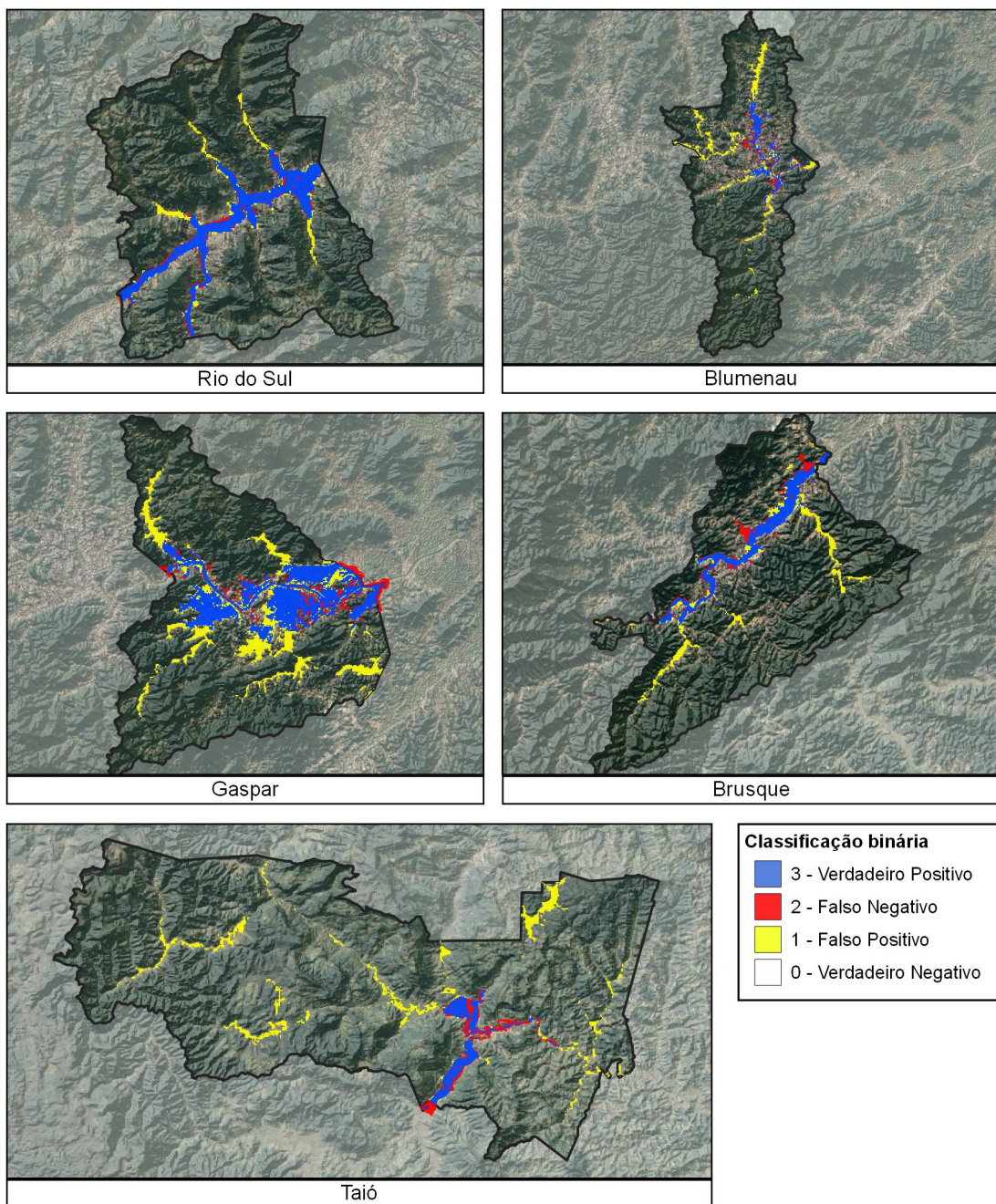
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.2 PERFORMANCE DO HAND

4.2.1 Classificação Binária Linear

Foi realizada a classificação binária de cada um dos cinco municípios ((Figura 13), sendo que Rio do Sul obteve a melhor performance do HAND. No Apêndice A apresenta-se a classificação binária de cada município individualmente com maior detalhamento e em escala.

Figura 13 – Classificação binária do HAND para os municípios analisados da BHRI em relação as manchas de inundação observadas nesses municípios.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Nos mapas de classificação, as células azuis correspondem aos verdadeiros positivos, ou seja, as células corretamente classificadas como inundação. A região vermelha corresponde aos falsos negativos, regiões nas quais o modelo não acusou inundação mas no evento houve. Já as células em amarelo indicam os falsos positivos, regiões onde não foi observada inundação, mas o modelo indicou. Em todos os mapas de classificação, observa-se que houve mais células corretamente classificadas do que erroneamente.

Observando as imagens de satélite abaixo das manchas, nota-se que há uma maior presença de falsos positivos nas extremidades das manchas, a medida que a mancha afasta-se da região urbana e aproxima-se da rural. Isso pode ocorrer devido ao fato do levantamento da mancha de inundação observada ter sido realizada principalmente nas regiões mais habitadas, próximas da população potencialmente atingida. Ou porque a população ocupou áreas de planícies, já que o HAND, como indicador de inundação, pode superestimar as áreas inundáveis em direção às cabeceiras. Já nas células vermelhas, ao redor da inundação, cujas células classificadas como falsos negativos, representam uma parcela do pixel de 90 m que não abrange a inundação. Possivelmente, se tivesse sido utilizado uma resolução maior de MDE, esses valores teriam sido corretamente classificados.

4.2.2 Índices de performance

A partir da classificação binária linear, foram gerados os índices de acerto e de ajuste que permitem avaliar a performance do descritor de terreno HAND em mapear inundação, gerados para cada um dos cinco municípios de estudo (Tabela 3).

Tabela 3 – Índices de acerto e ajuste do HAND em relação às manchas observadas na BHRI.

Município	C%	F%
Rio do Sul	86	75
Brusque	70	51
Blumenau	59	32
Taió	61	29
Gaspar	75	52

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para todos os municípios obtiveram-se valores de índice de acerto superiores a 50%, o que significa que houve mais células corretamente classificadas do que erroneamente. Nesses casos, os municípios que apresentaram um índice de acerto alto com um índice de ajuste baixo apresentam maior presença erros de falsos positivos do que falsos negativos. Os valores de índice de ajuste inferiores a 50% para Blumenau e Taió podem ser explicados, pelo fato de talvez a mancha de inundação ter sido levantada na parte mais urbana do município, visto que na parte central as manchas são melhor classificadas, ou pelas características da planície de inundação (Figura 13).

Nota-se que o município de melhor performance foi Rio do Sul, com índice de acerto de 86% e índice de ajuste de 75%. Conseqüentemente, a mancha de inundação de Rio do Sul foi utilizada para transferir o limiar de corte de inundação para a BHRI. Uma vez que Rio do Sul foi escolhido, utilizou-se manchas de recorrências menores para posterior classificação do mapa de perigo de inundação. Isso foi possível porque a Defesa Civil do município de Rio do Sul disponibiliza manchas de inundação para elevações menores. Os índices de performance para os três limiares de corte utilizados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Índices de acerto para as manchas observadas em Rio do Sul.

Cota (m)	C%	F%
8,5	87	32
10,5	73	53
13,0	86	75

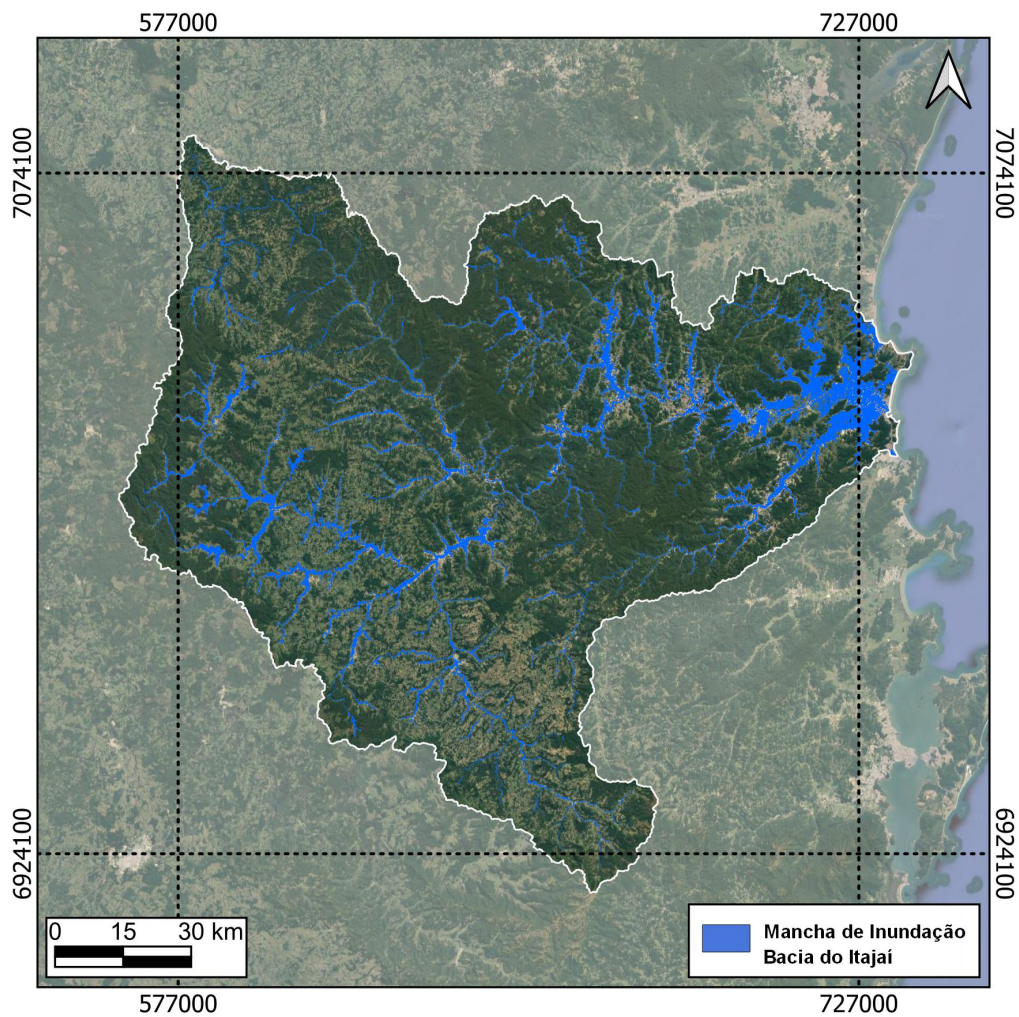
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Percebe-se que o índice de ajuste mantém-se superior a 70% para as cotas de cheia menores, mas o índice de acerto diminui com a redução da elevação. Isso ocorre porque há maior presença de falsos positivos para manchas de inundação de menor recorrência, mostrando que o modelo superestima as áreas propensas a inundar. Por um lado, a maior presença de falsos positivos em relação a falsos negativos é a favor da segurança, pois a inundação modelada é maior do que a observada. Por outro lado, isso pode induzir a maximização da classificação de risco nessas áreas, ainda mais considerando que a resolução do MDE utilizada foi de 90 m.

4.3 MANCHA DE INUNDAÇÃO DA BACIA DO ITAJAÍ REFERENTE AO EVENTO DE SETEMBRO DE 2011

Com base no município de melhor performance (Rio do Sul), foi gerada a mancha de inundação para a BHRI considerando a maior cota observada no evento de setembro de 2011 (Figura 14). Considera-se que na unidade de bacia hidrográfica o comportamento do escoamento possui características semelhantes e que a mancha de inundação gerada possui performance próxima da mancha de Rio do Sul com índice de acerto de 86% e índice de ajuste de 75%.

Figura 14 – Mancha de Inundação da Bacia do Itajaí referente ao evento de setembro de 2011 com base na transferência de limiar de corte de inundação de Rio do Sul.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.4 RISCO DE INUNDAÇÃO

4.4.1 Perigo

Utilizou-se o município de melhor performance (Rio do Sul) para determinar a recorrência das manchas de inundação por análise estatística de extremos. A estação escolhida foi a de código 83300200, operada pela Epagri-SC localizada no município de Rio do Sul. A estação possui 36 anos de dados consistidos disponíveis de cota, de 1979 à 2014.

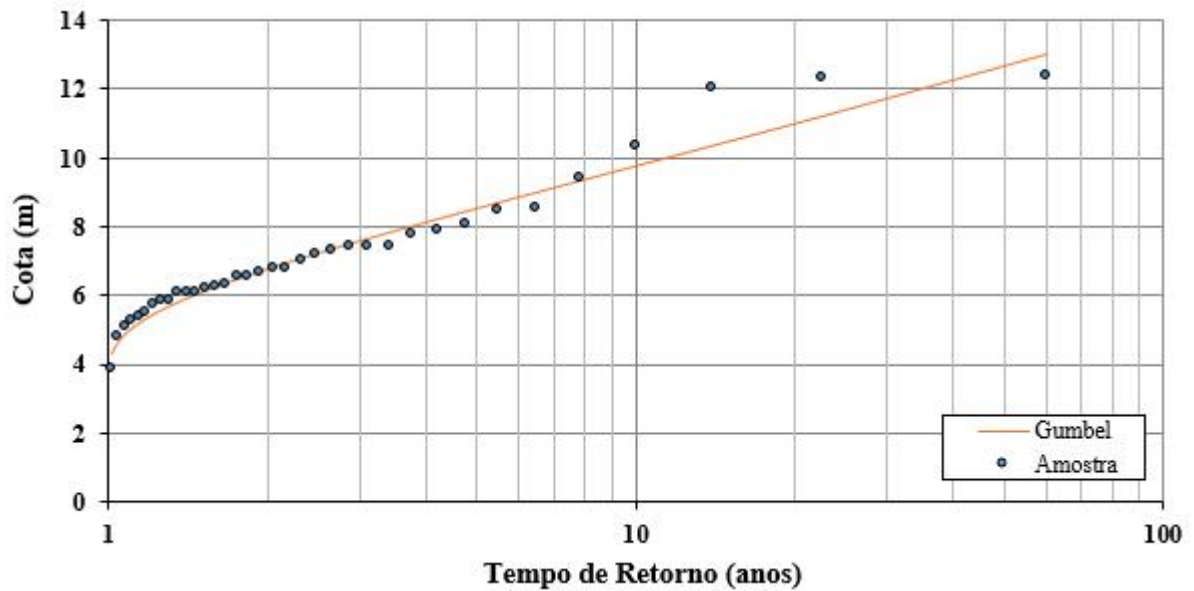
A média dos valores da amostra foi de 7,2 m, cujo valor máximo atingido foi de 12,4 m, referente ao evento de setembro de 2011. O resumo das características da amostra constam na Tabela 5. O ajuste da amostra a distribuição de Gumbel está apresentado na Figura 15 e Tabela 6. O valor de α e β foram 1,566 e 6,273, respectivamente.

Tabela 5 – Resumo da amostra.

Característica da amostra	Valor
Dimensão da amostra (anos)	36
Média (m)	7,2
Variância (m)	4,0
Máximo (m)	12,4
Mínimo (m)	3,9
Amplitude (m)	8,5
Desvio Padrão (m)	2,0
Assimetria (m)	1,3
Curtose (m)	1,6

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 15 – Ajuste da amostra para a distribuição de Gumbel.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Tabela 6 – Cotas máximas para a distribuição de Gumbel.

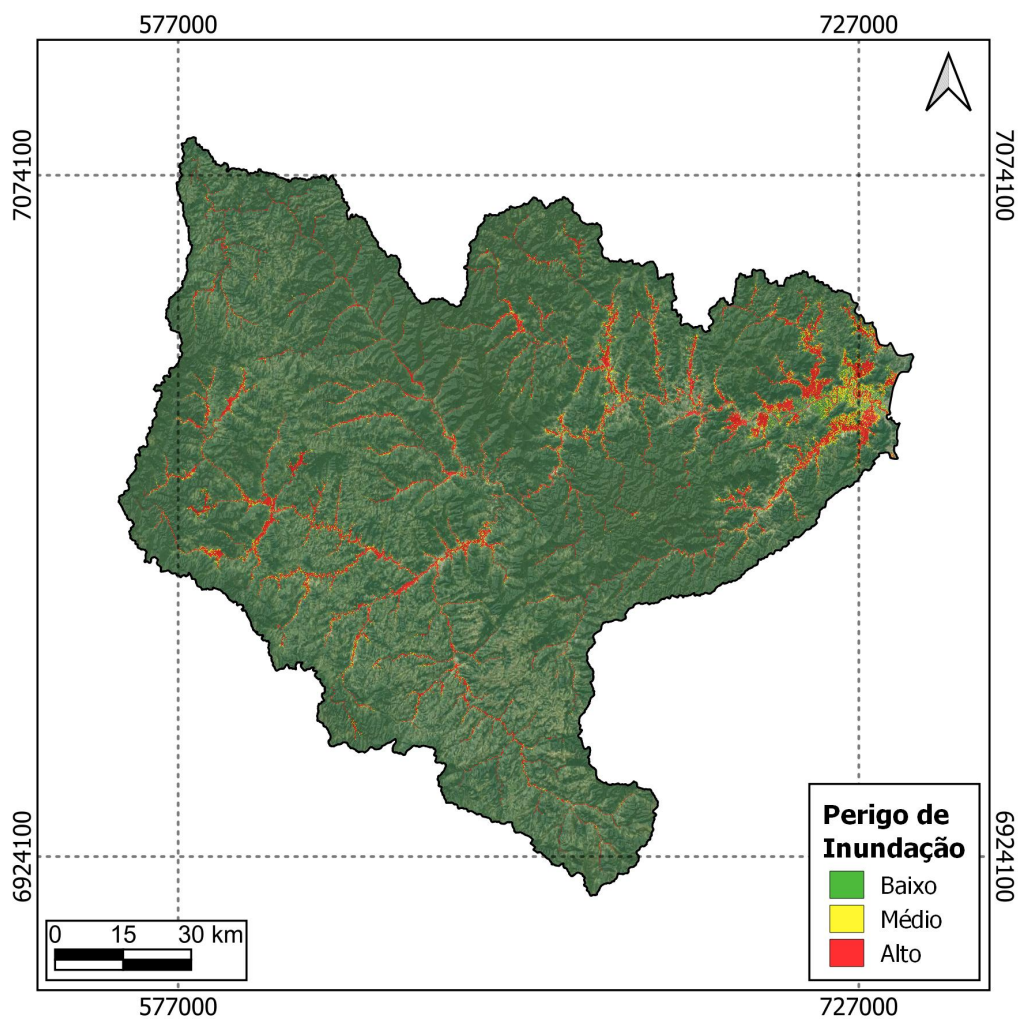
TR (anos)	Cota máxima (m)
1	3,9
2	6,8
5	8,5
10	9,8
15	10,5
20	11,0
25	11,3
50	13,0
100	14,0

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A análise estatística das cotas máximas observadas em Rio do Sul permitiram a classificação do perigo de inundação. A cota de 8,5 m foi utilizada para o limite de baixo perigo com TR de 5 anos, a cota de 10,5 m de TR 15 anos representou o intervalo de médio perigo e a cota de 13,0 m de TR 50 anos definiu as áreas de alto perigo, sendo esta última o valor máximo observado no evento de setembro de 2011. O valor máximo da amostra apresentado na Figura 15 é inferior a 13,0 m, possivelmente devido a diferença entre a cota ortométrica ou devido ao horário de medição não corresponder ao pico observado para o evento.

Na Figura 16 apresenta-se o mapa de perigo de inundação obtido para a BHRI. Percebe-se que pelo fato da maior parte da bacia estar fora da mancha de inundação de recorrência de 50 anos, 97% das células são classificadas com baixo perigo. Desses 3% restantes, 25% foram células classificadas como médio perigo e 75% como alto perigo. Percebe-se que as células classificadas com alto perigo de inundação são próximas de vales encaixados e cursos de rios, áreas mais frequentemente inundadas.

Figura 16 – Mapa de perigo de inundação da BHRI.

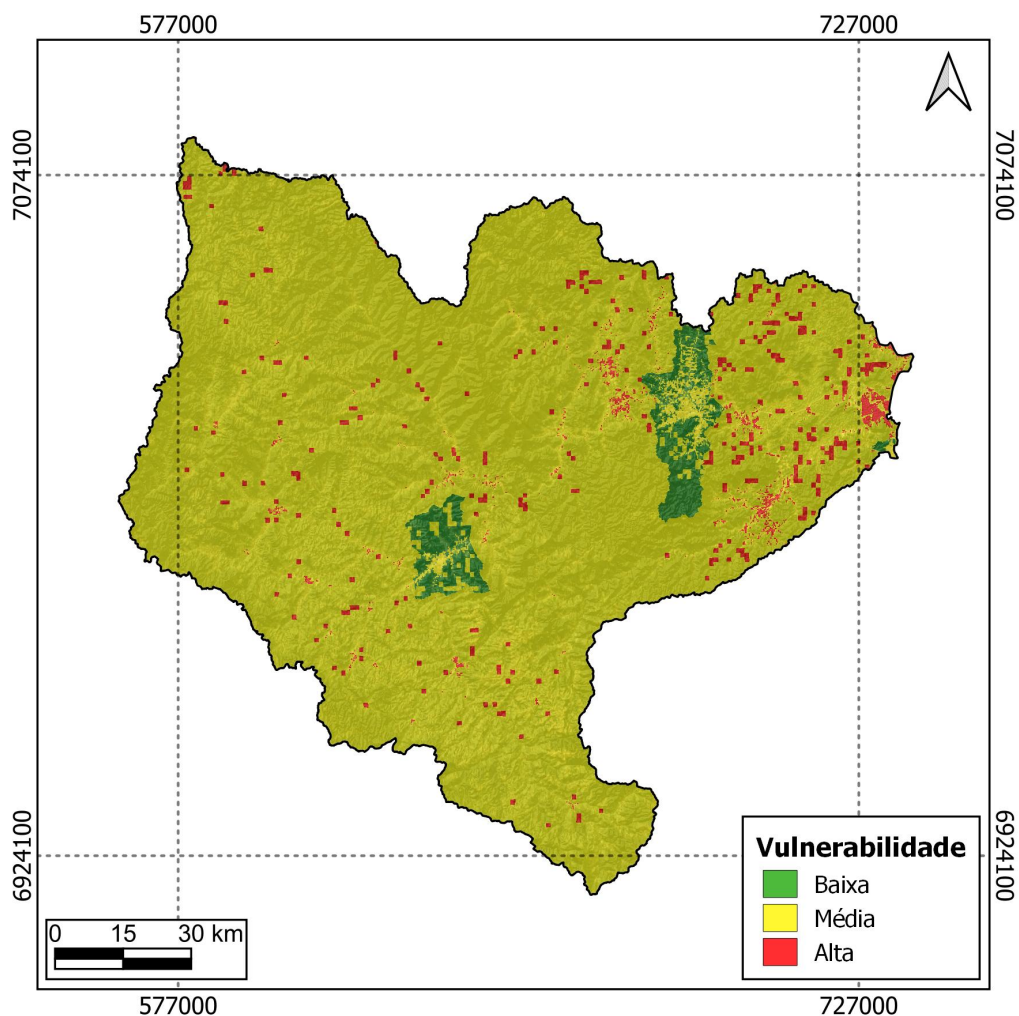


Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.4.2 Vulnerabilidade

O mapa de vulnerabilidade está apresentado na Figura 17. A maior parte da bacia foi classificada com vulnerabilidade média (94%). Dos 6% restantes, 50% foi classificada com vulnerabilidade baixa (municípios de Blumenau e Rio do Sul) e 50% com vulnerabilidade alta, sendo esses as células dos municípios com IDH médio mas com locais de concentração populacional, representados pelos pontos vermelhos ao longo da bacia.

Figura 17 – Mapa de vulnerabilidade à inundação da BHRI.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Nota-se que os municípios classificados principalmente com baixa vulnerabilidade são aqueles que possuem IDH considerado alto, Blumenau e Rio do Sul, que são justamente os municípios mais bem detalhados. Como além do IDH foram levados em consideração a densidade populacional, as áreas mais urbanas desses municípios foram classificadas com vulnerabilidade média. Percebe-se que há maior sensibilidade do IDH na classificação dos fatores de risco, em relação à distribuição populacional. Possivelmente, se o IDH fosse mais discretizado (pixel a pixel, como a distribuição populacional), os demais municípios seriam mais detalhados. Os pequenos pontos vermelhos no mapa representam os pontos dos municípios com IDH médio

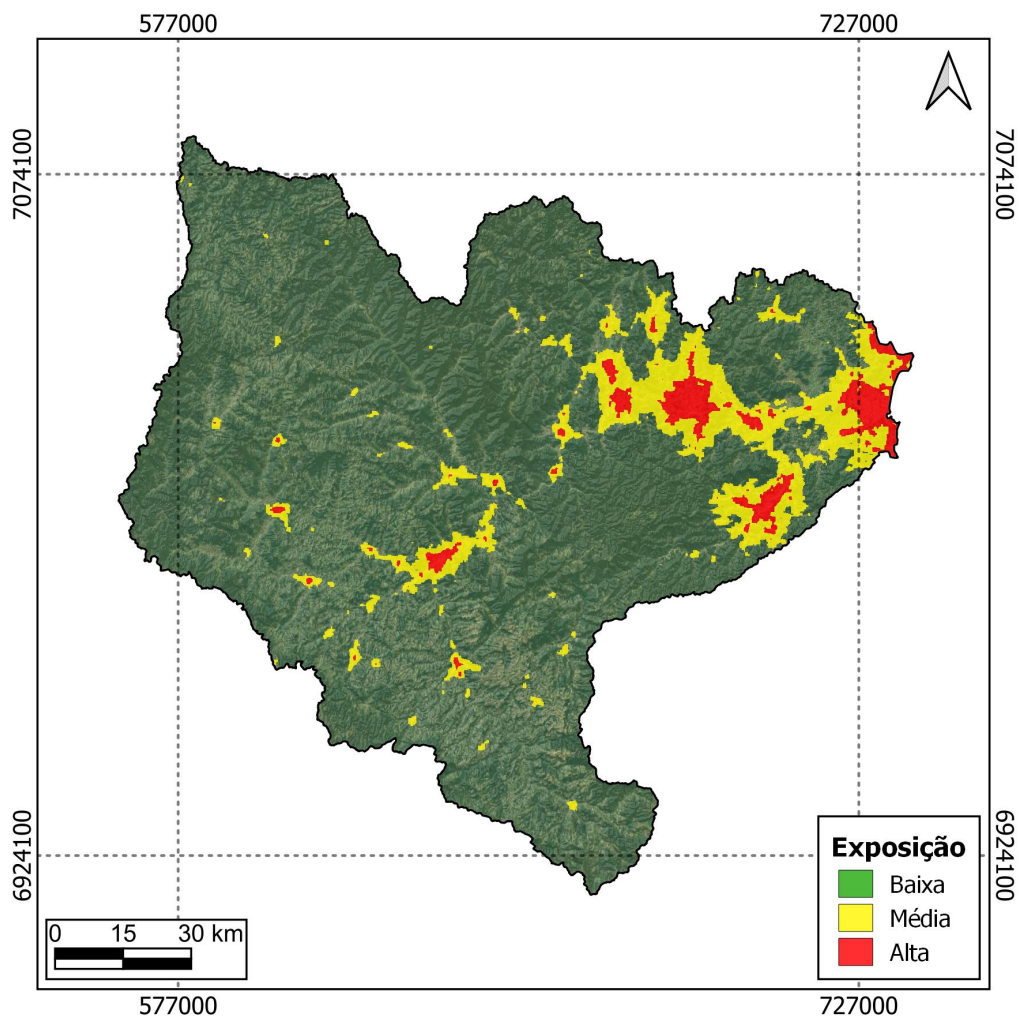
que possuem maior concentração populacional (maior que 60 habitantes), visto que nenhum município apresenta IDH baixo.

De modo geral, o fator vulnerabilidade não foi bem representado pela combinação do IDH com a distribuição populacional, visto que o IDH foi um valor pouco discretizado (a nível municipal) e que as faixas de classificação em baixo, médio e alto não permitiram uma análise mais detalhada desse fator de risco para a bacia.

4.4.3 Exposição

Na Figura 18 apresenta-se a exposição obtida para a BHRI. Na bacia, há predominância de exposição alta nas regiões nas quais mais valores (pessoas, bens econômicos ou patrimoniais, entre outros) que estão sujeitos ou expostos ao impacto, sendo que essas regiões correspondem a 3% da área da bacia (em vermelho).

Figura 18 – Mapa de exposição à inundação da BHRI.



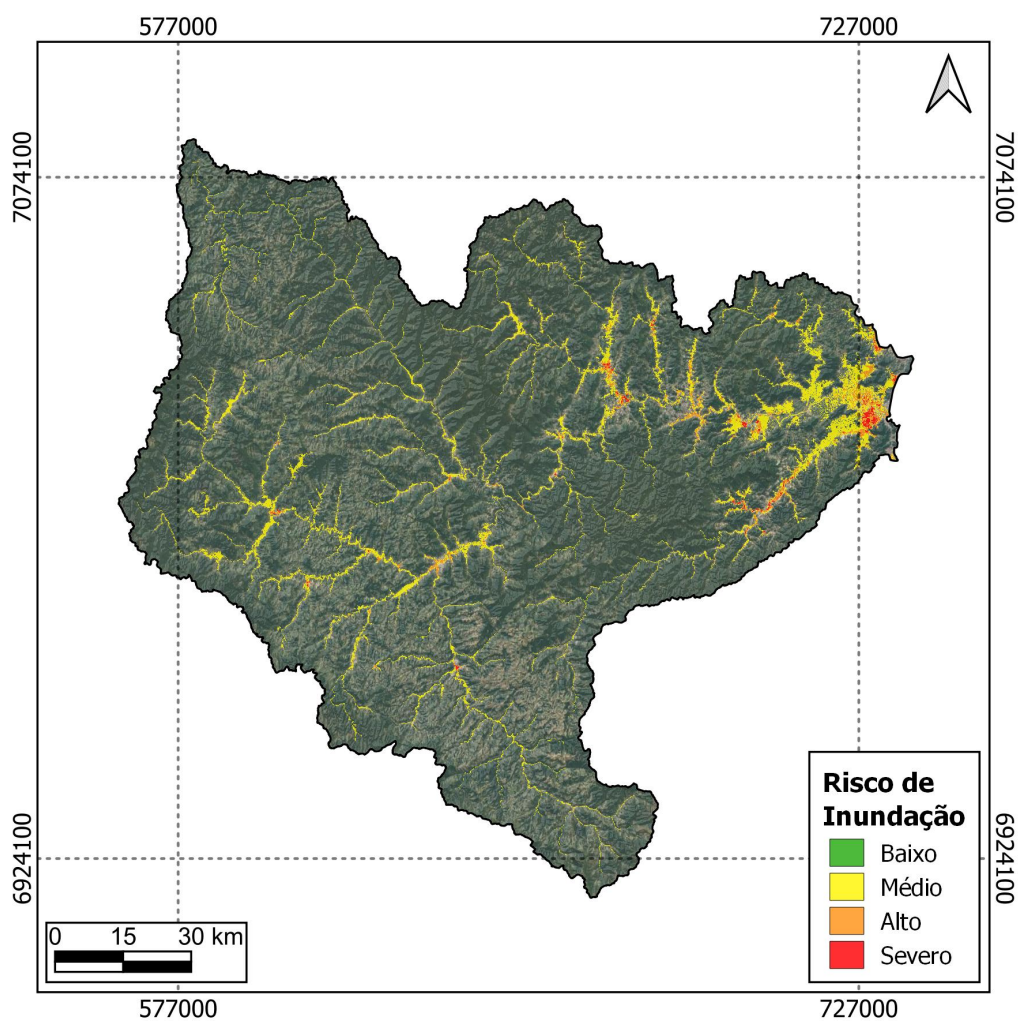
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Visualmente, o mapa obtido foi muito próximo ao do estudo realizado por Speckhann (2018), embora as fontes de luzes noturnas tenham sido diferentes. Ademais, 88% da bacia foi classificada com baixa exposição e 9% com média exposição. Percebe-se que a imagem de luz noturna é um bom indicador porque corresponde às áreas com a maior concentração de pessoas e estruturas, ou seja, centros urbanos e locais mais industrializados.

4.4.4 Mapeamento de Risco de Inundação

A partir dos mapas de perigo, exposição e vulnerabilidade, determinados utilizando descritor de terreno e aspectos socioeconômicos, foi possível elaborar o mapa de risco de inundação da BHRI apresentado na Figura 19. Como esperado, a maior parte da bacia foi classificada com risco baixo (93%), por estar fora dos limites da mancha de maior período de retorno observada relativa ao evento extremo de setembro de 2011. Dos 7% restantes, 90% foi classificado com risco médio, 8% com risco alto e 2% com risco severo.

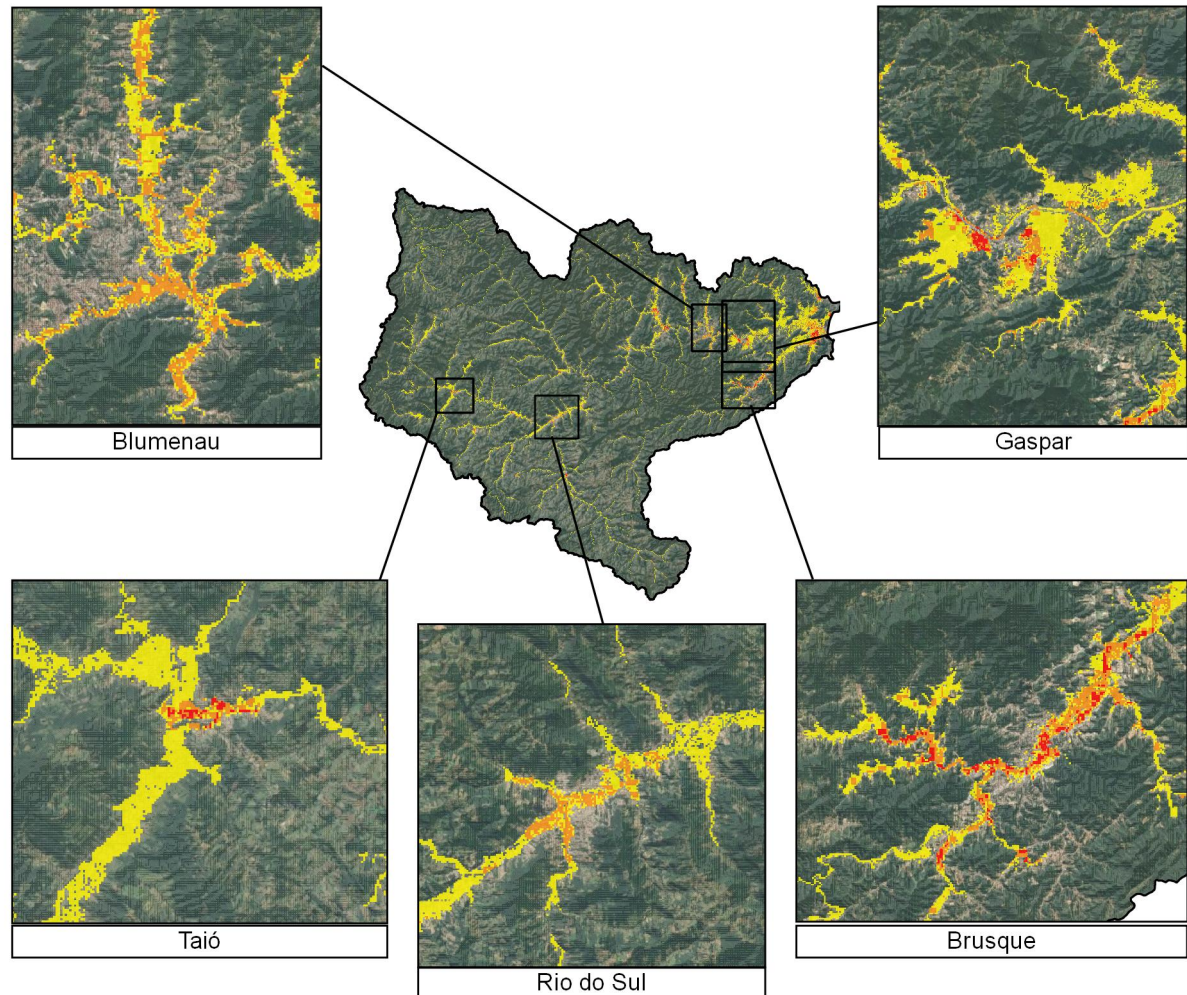
Figura 19 – Mapa de Risco de Inundação da BHRI utilizando descritor de terreno e aspectos socioeconômicos.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Na Figura 20 é possível observar em detalhe os municípios de Rio do Sul, Blumenau, Brusque, Gaspar e Taió, utilizados para determinar a performance do descritor HAND. Percebe-se que Brusque é o município com maiores regiões classificadas com risco severo.

Figura 20 – Risco de Inundação da BHRI - *Zoom* dos principais municípios estudados.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

5 CONCLUSÕES

O mapa de risco de inundação da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí (BHRI) foi elaborado utilizando uma metodologia que incorpora além de descritor de terreno associado a análise de extremos, aspectos socioeconômicos da população. A maior parte da bacia foi classificada com risco baixo (93%), por estar fora dos limites da mancha de maior período de retorno observada. Dos 7% restantes, 90% foram classificados com risco médio, 8% com risco alto e 2% com risco severo.

A respeito da análise de desempenho do descritor de terreno HAND, a melhor performance foi obtida para o município de Rio do Sul, com índice de acerto de 86% e índice de ajuste de 75%. Em relação ao perigo, pela transferência de limiar de corte da mancha de Rio do Sul, foram elaboradas manchas de inundação para a BHRI e atribuídos a elas diferentes tempos de retorno (TR), cujo maior valor foi de 50 anos de recorrência. 97% das células foram classificadas com baixo perigo. Dos 3% restantes, 25% foram células classificadas como médio perigo e 75% como alto perigo. O descritor de terreno HAND não representou bem áreas planas (próximo a foz do Rio Itajaí). Isso pode ter ocorrido devido ao uso do Modelo Digital de Elevação de resolução de 90 m, que suaviza o terreno e que possui muitas falhas em regiões de banhado e cultivos, que é o caso dessas áreas.

A maior parte da bacia foi classificada com vulnerabilidade média (94%). Dos 6% restantes, 50% foram classificados com vulnerabilidade baixa (municípios de Blumenau e Rio do Sul) e 50% com vulnerabilidade alta. Em relação à exposição, 88% da bacia foi classificada com baixa exposição, 9% com média exposição e 3% com alta exposição.

Em relação ao mapeamento de risco de inundação, outras variáveis fossem incorporadas em uma análise multicritério a partir de dados coletados com a população atingida e de setores censitários do IBGE. Além disso, poderia ser feita uma análise de sensibilidade às faixas de classificação das diferentes categorias de risco (baixo, médio e alto) de modo a avaliar quais seriam os melhores intervalos de transição de uma categoria para outra.

Os resultados obtidos neste trabalho indicam a existência de potencial da integração de técnicas de sensoriamento remoto, análises hidrológicas e socioeconômicas, para auxiliar a compreensão espaço-temporal da dinâmica sócio-hidrológica em locais atingidos por inundações. Dessa forma, o mapeamento de risco de inundação pode ser uma ferramenta importante de planejamento urbano e de definição de medidas de mitigação de inundações.

REFERÊNCIAS

ADDISON, D.; STEWART, B. Nighttime Lights Revisited: The Use of Nighttime Lights Data as a Proxy for Economic Variables, nov. 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1526.1200.

AFSHARI, S. *et al.*, Omranian, E., and Fekete, B. M.: Comparison of new generation low-complexity flood inundation mapping tools with a hydrodynamic model, **J. Hydrol.**, 556, 539–556, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.036>, 2018.

ALVES, M.P.A. **Análise comparativa dos fatores ambientais nos eventos de inundações na bacia hidrográfica do vale do itajaí: novembro de 2008 e setembro de 2011.** 2013. Universidade Federal de Santa Catarina.

ARRIGHI, C. *et al.* Urban micro-scale flood risk estimation with parsimonious hydraulic modelling and census data. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 13, n. 5, p. 1375–1391, 2013. Disponível em: <https://nhess.copernicus.org/articles/13/1375/2013/>.

ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO DAS REGIÕES METROPOLITANAS BRASILEIRAS, Brasília, PNUD, IPEA, Fundação João Pinheiro, 2017.

BATES, P. D.; DE ROO, A. P. J. A simple raster-based model for flood inundation simulation. **Journal of Hydrology**, v. 236, n. 1, p. 54–77, 2000.

CASAGRANDE, L. **Previsão de cheias na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, SC, usando previsão numérica de tempo e modelagem hidrológica.** 2015. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

CORDERO, A.; SALVADOR, D.; REFOSCO, J. C. Cotas-enchente do município de Blumenau. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2013.

CUNNANE, C. 1989. **Statistical Distributions for Flood Frequency Analysis.** Word Meteorological Organization Operational Hydrology Report, No. 33, Geneva.

DEGIORGIS, M. *et al.* Classifiers for the detection of flood-prone areas using remote sensed elevation data. **Journal of Hydrology**, v. 470-471, p. 302–315, 2012. ISSN 0022-1694. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216941200755X>.

DONCHYTS, G. *et al.* **Global 30m Height Above the Nearest Drainage.** *In:* DOI: 10.13140/RG.2.1.3956.8880.

ELSHORBAGY, A. *et al.* Topography- and nightlight-based national flood risk assessment in Canada. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 4, p. 2219–2232, 2017.

FRANK, B; PINHEIRO, A. **Enchentes na Bacia do Rio Itajaí: 20 anos de experiências**. Blumenau: Edifurb., 2003.

GAIN, A.; HOQUE, M. Flood risk assessment and its application in the eastern part of Dhaka City, Bangladesh. **Journal of Flood Risk Management**, v. 6, jan. 2012. DOI: 10.1111/jfr3.12003.

GAROUSI-NEJAD, Irene *et al.* Terrain Analysis Enhancements to the Height Above Nearest Drainage Flood Inundation Mapping Method. **Water Resources Research**, v. 55, n. 10, p. 7983–8009, 2019. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019WR024837>.

GICHAMO, T.Z.; TARBOTON, D.G. UEB parallel: Distributed snow accumulation and melt modeling using parallel computing. **Environmental Modelling Software**, v. 125, p. 104614, 2020. ISSN 1364-8152. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815219304050>.

HOCINI, N *et al.* Performance of automated methods for flash flood inundation mapping: A comparison of a digital terrain model (DTM) filling and two hydrodynamic methods. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, p. 2979–2995, jun. 2021. DOI: 10.5194/hess-25-2979-2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico 2010. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. In: C.B. Field, et al. eds. Special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012.

ISDR - INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION. **Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives**. Preliminary version. Geneva, Switzerland: UN/ISDR, 2002.

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA). 2011. Estudo preparatório para o projeto de prevenção e mitigação de desastres na bacia do rio Itajaí. Relatório Final.

JING, X. *et al.* Comparison between the Suomi-NPP Day-Night Band and DMSP-OLS for Correlating Socio-Economic Variables at the Provincial Level in China. **Remote Sensing**, v. 8, p. 17, dez. 2015.

LUCONI, J. *et al.* Cotas-enchente do município de Brusque-SC. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2015.

- MANFREDA, S.; SALVATORE, S. *et al.* Detection of Flood-Prone Areas Using Digital Elevation Models. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 16, p. 781–790, jul. 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000367.
- MANFREDA, S.; SAMELA, C. *et al.* Flood-prone areas assessment using linear binary classifiers based on flood maps obtained from 1D and 2D hydraulic models. **Natural Hazards**, jun. 2015.
- MERZ, B. *et al.* Charting unknown waters—On the role of surprise in flood risk assessment and management. **Water Resources Research**, v. 51, n. 8, p. 6399–6416, 2015. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015WR017464>.
- MGHIRBI, O. *et al.* Mapping for the management of diffuse pollution risks related to agricultural plant protection practices: case of the Etang de l'Or catchment area in France. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, mai. 2018. DOI: 10.1007/s11356-018-1556-7.
- MOEL, H.; ALPHEN, J. van; AERTS, J. C. J. H. Flood maps in Europe ndash; methods, availability and use. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 9, n. 2, p. 289–301, 2009. Disponível em: <https://nhess.copernicus.org/articles/9/289/2009/>.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. **Hidrologia Estatística**. [S.l.]: CPRM, 2007.
- NOBRE, A. *et al.* HAND contour: A new proxy predictor of inundation extent. **Hydrological Processes**, v. 30, jun. 2015. DOI: 10.1002/hyp.10581.
- ORTEGA, L.; RUEDA, A. Parallel drainage network computation on CUDA. **Computers and Geosciences**, v. 36, n. 2, p. 171–178, 2010. ISSN 0098-3004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300409002970>.
- PREETY, K. *et al.* Accuracy Assessment, Comparative Performance, and Enhancement of Public Domain Digital Elevation Models (ASTER 30 m, SRTM 30 m, CARTOSAT 30 m, SRTM 90 m, MERIT 90 m, and TanDEM-X 90 m) Using DGPS. **Remote Sensing**, v. 14, n. 6, 2022. DOI: 10.3390/rs14061334. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/6/1334>.
- RENNÓ, C. D. *et al.* HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3469–3481, 2008. ISSN 0034-4257. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442570800120X>.
- RINCÓN, D.; KHAN, U. T.; ARMENAKIS, C. Flood Risk Mapping Using GIS and Multi-Criteria Analysis: A Greater Toronto Area Case Study. **Geosciences**, v. 8, n. 8, 2018. ISSN 2076-3263. DOI: 10.3390/geosciences8080275. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3263/8/8/275>.

SAMELA, C.; MANFREDA, S. *et al.* DEM-Based Approaches for the Delineation of Flood-Prone Areas in an Ungauged Basin in Africa. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, fev. 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001272.

SAMELA, C.; TROY, T. J.; MANFREDA, S. Geomorphic classifiers for flood-prone areas delineation for data-scarce environments. **Advances in Water Resources**, v. 102, p. 13–28, 2017. ISSN 0309-1708. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170817300738>.

SANGWAN, N.; MERWADE, V. A Faster and Economical Approach to Floodplain Mapping Using Soil Information. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 51, n. 5, p. 1286–1304, 2015.

SCHETTINI, C. A. F. Caracterização Física do Estuário do Rio Itajaí-açu, SC. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, 2002.

SCRIVEN, B.; MCGRATH, H.; STEFANAKIS, E. CERC-HAND-D: A Tool for Supporting On-the-Fly Flood Mapping in Canada. *In: 2021 IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM IGARSS*. [S.l.: s.n.], 2021. P. 519–522. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553519.

SENGER, G. **Mapeamento de Mancha de Inundação no Vale do Itajaí: Uma comparação entre os métodos HAND e AHP**. 2021. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

SILVA, P. R.; SOUZA, F. Inundações no município de Rio do Sul: uma análise dos eventos de 2011 e 2013 à luz da gestão de risco de desastres. **Revista Ordem Pública**, v. 9, 2016.

SOUZA, J. V. B. **Uso de descritores de terreno para o mapeamento de áreas suscetíveis à inundação**. 2021. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

SPECKHANN, G. A. **Uma proposta de mapeamento de risco de inundação na bacia do Rio Itajaí utilizando descritores de terreno**. 2018. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

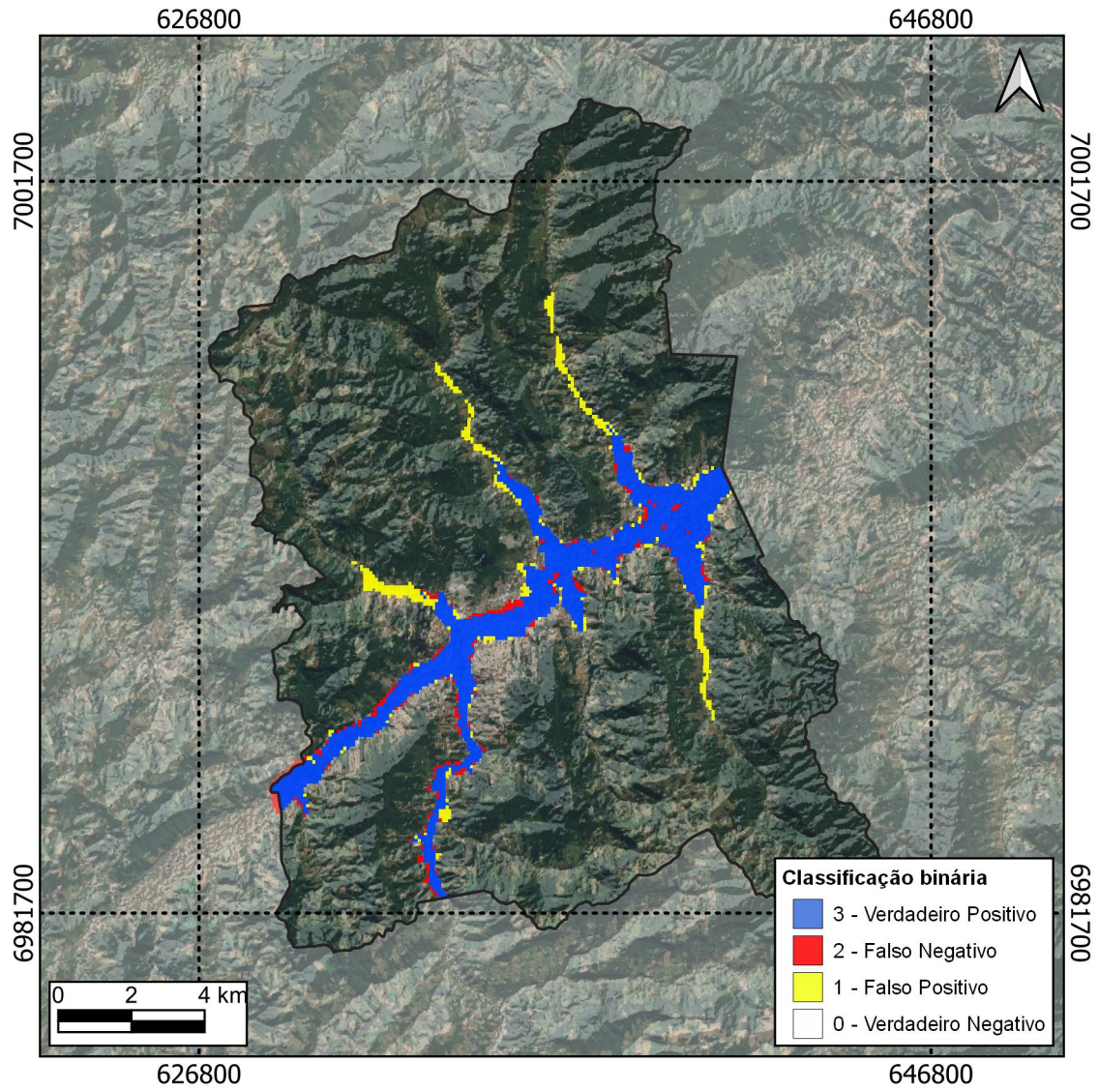
TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 33, n. 2, p. 309–319, 1997. Disponível em:
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96WR03137>.

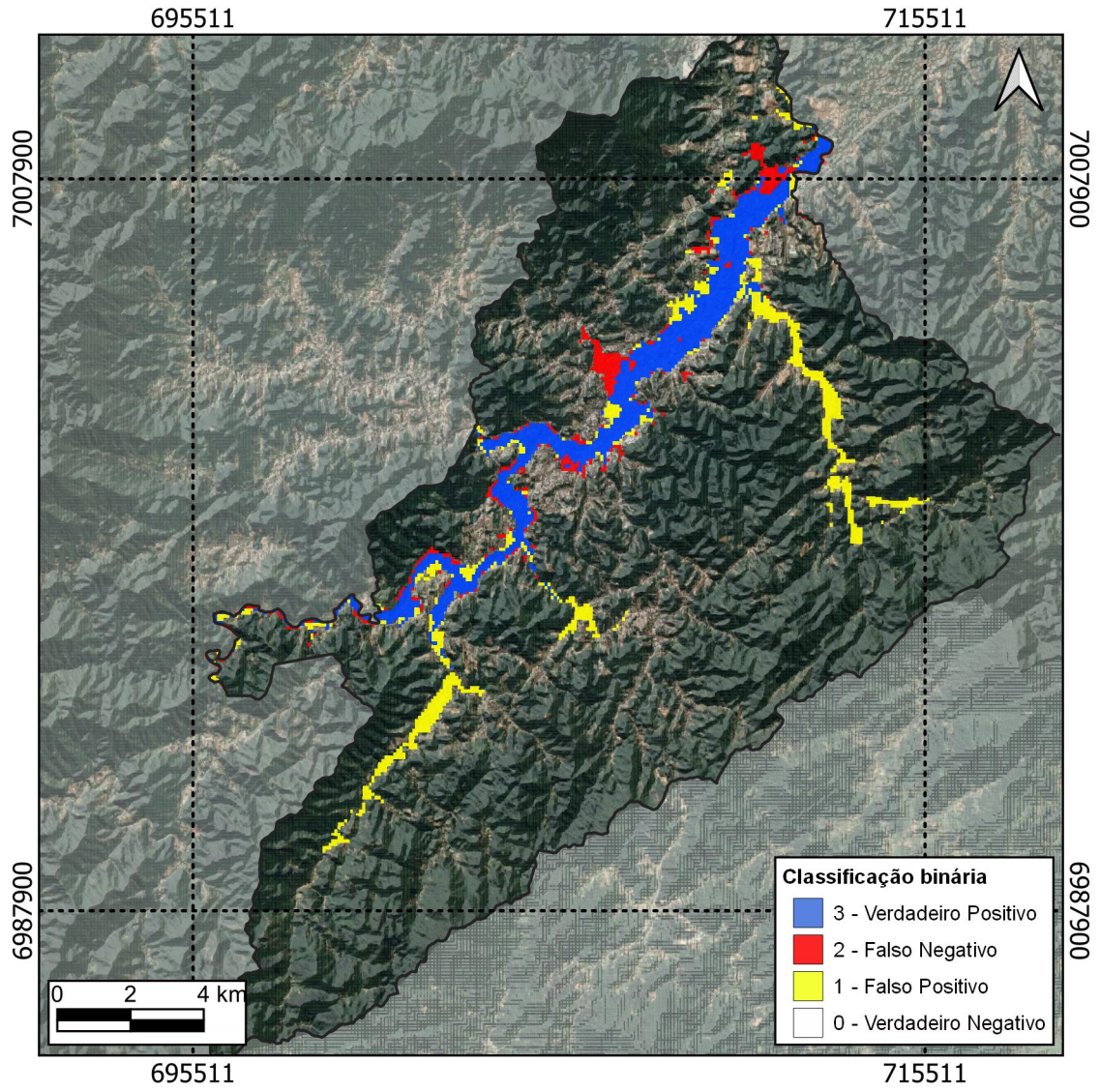
TENG, J. *et al.* Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling Software**, v. 90, p. 201–216, 2017. ISSN 1364-8152. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815216310040>.

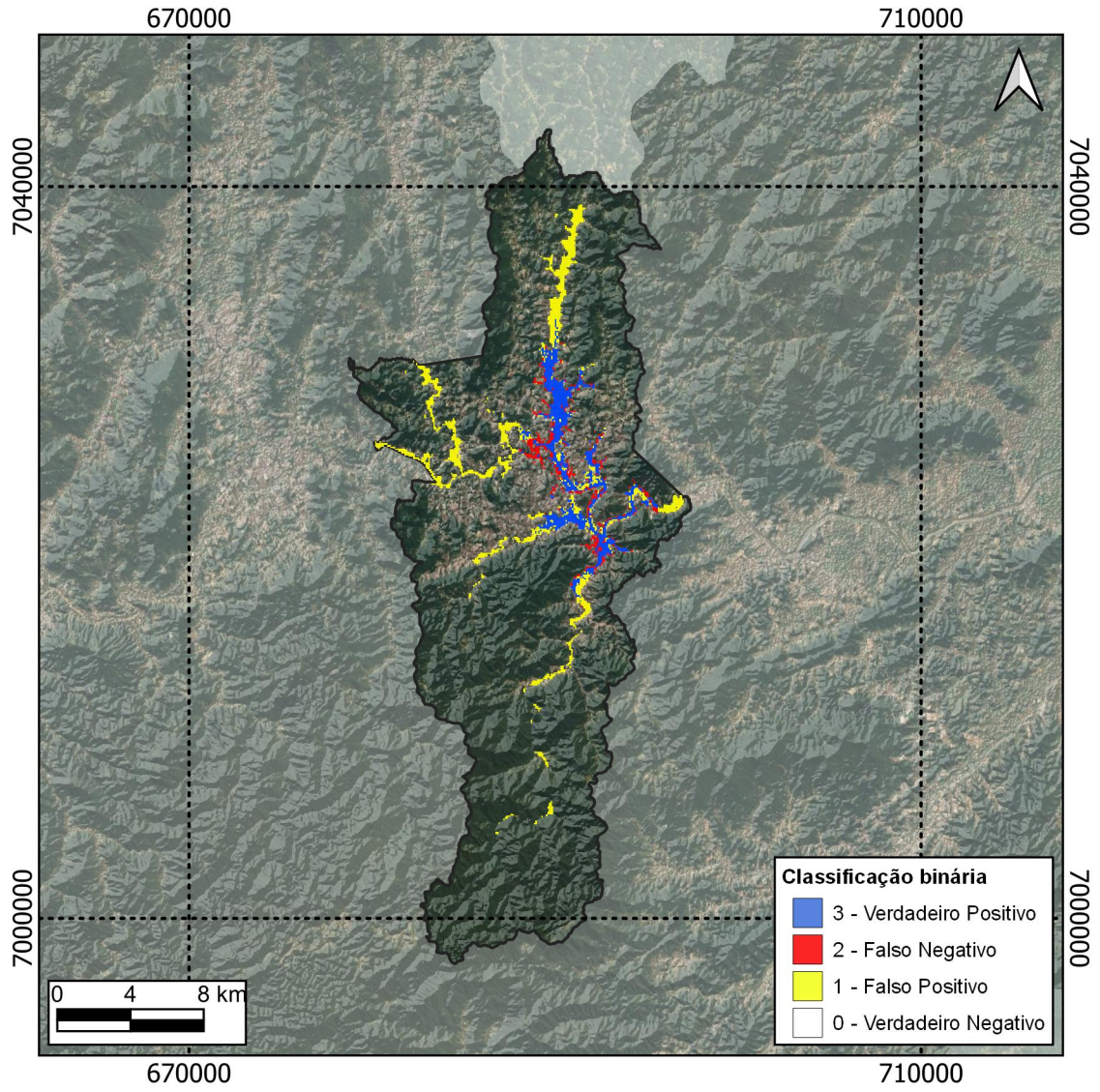
UNISDR (2015). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. 3rd United Nations World Conference on DRR, Sendai. <https://doi.org/10.18356/02e5faa7-en>.

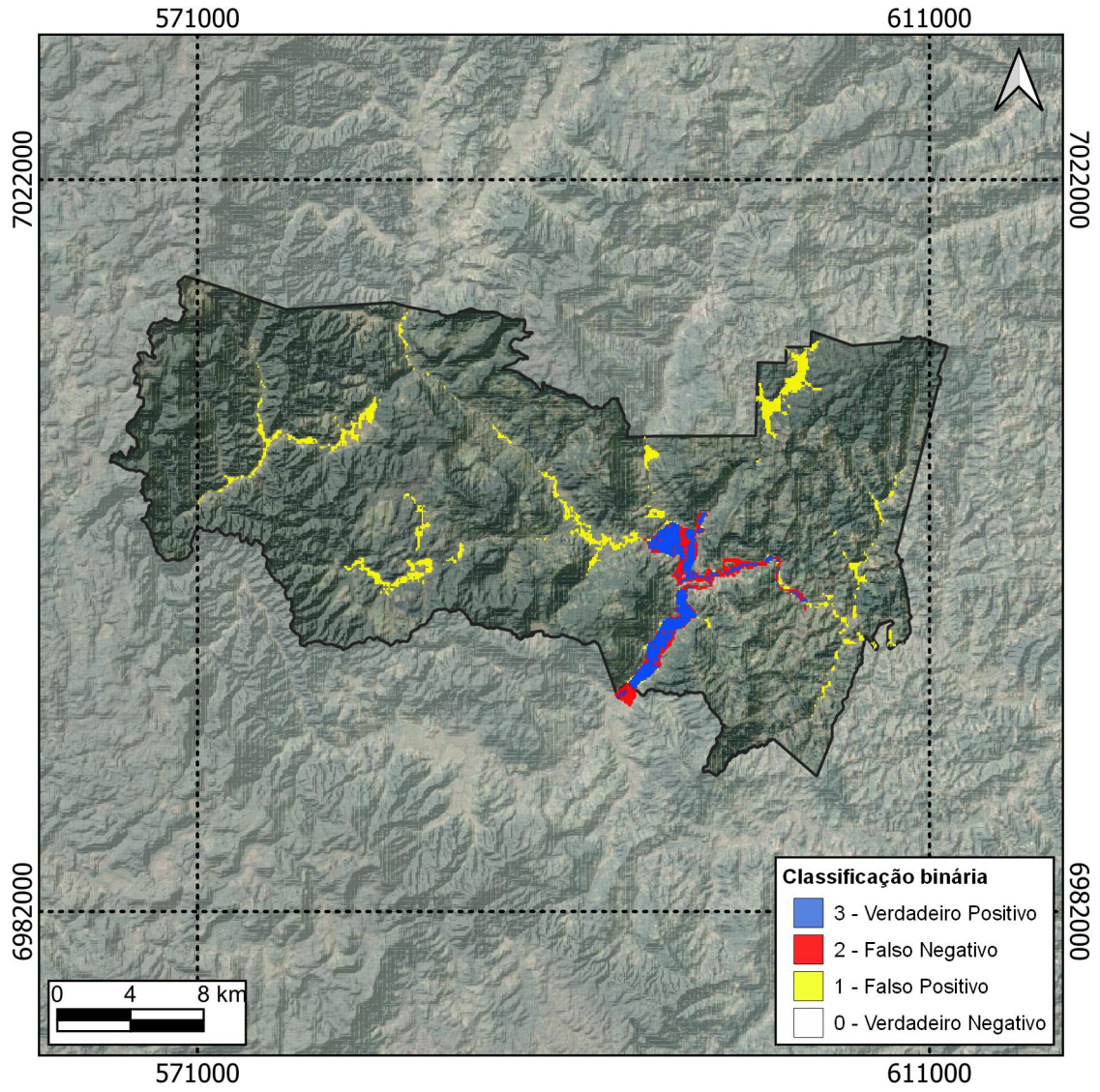
USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY 2016. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). 3 Arc-Second Global.

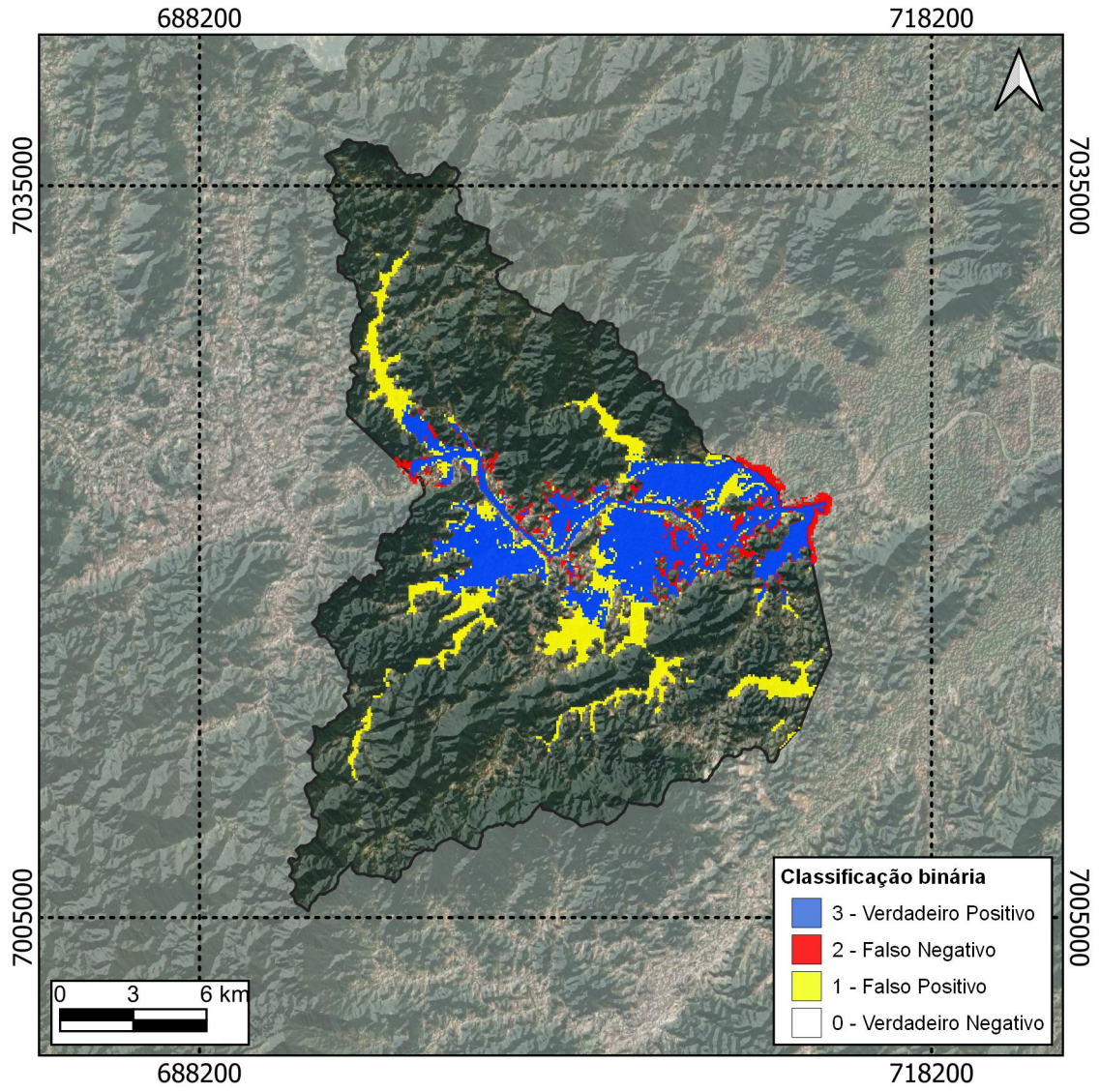
**APÊNDICE A - MAPAS DE CLASSIFICAÇÃO BINÁRIA: RIO DO SUL, BRUSQUE,
BLUMENAU, TAIÓ E GASPAR, RESPECTIVAMENTE**





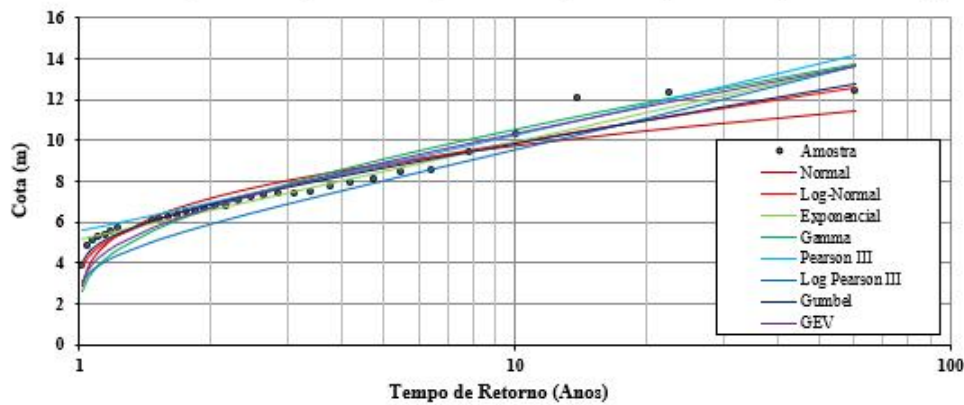






APÊNDICE B - AJUSTE DA SÉRIE HISTÓRICA DE COTAS À DIFERENTES DISTRIBUIÇÕES.

Parâmetro	Normal	Log Normal	Exponencial	Gama	Pearson III	Log Pearson III	Gumbel	GEV
μ (Média)	7.177	1.933	-	-	-	-	-	-
σ (Desv. P.)	2.009	0.281	-	-	-	-	-	-
α	-	-	5.136	7.000	5.600	1.800	6.280	6.000
β	-	-	2.080	1.000	0.033	0.350	1.590	2.000
Ω	-	-	-	-	-16.958	0.350	-	0.035
R^2	0.877	0.942	0.949	0.937	0.945	0.957	0.980	0.946
Soma Delta ² (1e-6)	0.000018	0.000008	0.000007	0.000024	0.000013	0.000013	0.000007	0.000014



TR	Normal	Log Normal	Exponencial	Gama	Pearson III	Log Pearson III	Gumbel	GEV
1	2.5	3.6	5.2	2.3	5.6	2.9	4.2	2.9
2	7.2	6.9	6.6	6.7	6.9	5.9	6.8	6.7
5	8.9	8.7	8.5	9.1	8.8	8.1	8.5	8.9
10	9.8	9.9	9.9	10.5	10.3	9.6	9.8	10.3
15	10.2	10.5	10.8	11.3	11.1	10.5	10.5	11.1
20	10.5	11.0	11.4	11.8	11.7	11.1	11.0	11.6
25	10.7	11.3	11.8	12.2	12.2	11.6	11.4	12.0
50	11.3	12.3	13.3	13.4	13.8	13.2	13.0	13.3
100	11.9	13.3	14.7	14.6	15.3	14.9	14.0	14.5