



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA CHEIA DE MAIO DE 2024 NA CIDADE
DE SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ**

Paloma Kaspari

Porto Alegre, 05 de janeiro de 2024



PALOMA KASPARI

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA CHEIA DE MAIO DE 2024 NA CIDADE
DE SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ**

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE ENGENHEIRA AMBIENTAL.

Orientador: Fernando Mainardi Fan

Porto Alegre, 05 de janeiro de 2024



CIP - Catalogação na Publicação

Kaspari, Paloma
SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA CHEIA DE MAIO DE 2024 NA
CIDADE DE SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ / Paloma Kaspari. --
2024.
57 f.
Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Inundações. 2. MGB. 3. Dragagem. 4.
Reflorestamento. 5. São Sebastião do Caí. I. Mainardi
Fan, Fernando, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).



PALOMA KASPARI

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA CHEIA DE MAIO DE 2024 NA CIDADE
DE SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 10 de janeiro de 2025 pela Comissão avaliadora constituída pelos examinadores:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan

.....
Prof. Dr. Walter Collischonn

.....
Mestra Ingrid Petry



AGRADECIMENTOS

Primeiramente, queria agradecer aos meus pais, que sempre incentivaram meus estudos e me apoiaram emocionalmente e financeiramente toda a graduação, não medindo esforços para tornar essa conquista real. Sem vocês eu não seria nada. Vocês são meu pilar e minha força motriz.

Queria agradecer também meus amigos, colegas e companheiros que acompanharam toda minha graduação. Em especial aos meus amigos de barra, que foram fundamentais no início da graduação para conseguir enfrentar as primeiras cadeiras da engenharia, acompanhando as monitorias e ajudando a estudar para as provas.

Aos meus amigos próximos, Luiza, Pedro, Pipa e Julia Irmão que viveram comigo todas as conquistas e frustrações da graduação, que me incentivaram, que me ouviram, que estudaram comigo e me ensinaram tantas coisas. Vocês tornaram minha graduação mais leve e possível, muito obrigada.

Aos meus professores, principalmente do IPH, que são referência quanto profissionais e que me inspiram muito, dentro e fora da Universidade, em especial, ao meu orientador, professor Fernando Mainardi Fan, que me auxiliou neste trabalho e é um exemplo de professor e pessoa.

Aos meus colegas do HGE, Rafa Cabeleira e Gabriel Matte, que me ajudaram de todas maneiras possíveis para rodar o modelo MGB e o IPH Hydro Tools. Ao meu professor Walter Collischonn, que me auxiliou com ideias e discussões enriquecedoras para realização deste trabalho, além de ser uma inspiração para mim.

À todas as pessoas que compartilhei a vida durante minha caminhada acadêmica, na iniciação científica, Empresa Júnior e estágios. Todos contribuíram de alguma maneira na minha formação e carreguei comigo todas trocas que tivemos. Muito obrigada.



RESUMO

KASPARI, Paloma. **Simulação hidrológica da cheia de maio de 2024 na cidade de São Sebastião do Caí**. 2024. 57 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

A inundação de maio de 2024, que atingiu grande parte do Rio Grande do Sul e impactou severamente a bacia hidrográfica do rio Ca , evidenciou os desafios impostos pelas mudanças climáticas e a necessidade de planejamento integrado e a es coordenadas para mitigar os impactos futuros. Historicamente, o rio Ca  apresenta períodos de inunda o, porém, desde a funda o da cidade, a área de várzea do rio foi antropizada e progressivamente ocupada pela popula o e assim, a cidade e popula o coexistem com inunda es. Com a intensifica o das mudanças climáticas, entretanto, verificou-se um aumento na intensidade e na frequência desses eventos, evidenciando a urgência na implementa o de solu es eficazes para seu enfrentamento. Este estudo teve como objetivo simular a cheia de maio de 2024 na cidade de São Sebast o do Caí, analisando o máximo impacto de altera es drásticas na bacia, a fim diminuir as consequências de cheias dessa magnitude, como a realiza o de dragagens profundas e reflorestamento total da bacia. Para isso, utilizou-se o módulo hidrodinâmico do modelo MGB, que permite simular o comportamento hidrológico e hidrodinâmico de grandes bacias. No presente estudo, a bacia hidrográfica do rio Ca  foi modelada utilizando o método Inercial. A primeira parte do trabalho consistiu na calibra o do modelo MGB para representar com precisão a resposta hidrológica da bacia, com foco na cidade de São Sebast o do Caí, e simular o evento de maio de 2024 de forma fidedigna   realidade. Na segunda parte do trabalho, os dois cenários extremos, dragagem e reflorestamento, foram comparados   simula o da cheia realizada na primeira parte. Os resultados indicaram que a mancha de inunda o para o evento de maio de 2024 apresentou grande semelhança com a mancha gerada pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), embora com algumas lacunas em áreas específicas. A profundidade de dezessete metros registrada na esta o fluviométrica Barca do Caí foi reproduzida com precisão, indo de encontro com os valores observados no evento real. Além disso, os coeficientes Nash e Nash-log calculados foram considerados aceitáveis, indicando a adequa o do modelo. Referente aos cenários simulados, a dragagem apresentou resultados mais promissores que o reflorestamento da bacia. Esta interven o reduziu em dois metros a profundidade da inunda o que atingiria a cidade, porém não alterou a extensão da mancha e nem houve diminui o nas vazões das esta es fluviométricas observadas. Isso demonstra que esta alternativa diminuiria o impacto causado por uma cheia extrema, principalmente em rela o a altura que a água atingiria a cidade, porém os mesmos lugares seriam atingidos, não sendo considerado uma alternativa eficaz, além de envolver altos custos de projeto e manuten o. Para o cenário de reflorestamento da bacia, houve altera o ínfima de 1 metro na altura da cheia, porém não houve diferença na extensão da mancha de inunda o na cidade de São Sebast o do Caí, demonstrando também não ser uma alternativa eficaz. Mesmo tendo em vista que o cenários simulados são uma extrapola o da realidade,   importante que estes máximos e seus efeitos sejam testados. Neste trabalho observou-se que as interven es extremas de dragagem e reflorestamento propostas não modificariam os impactos causados pela cheia de forma relevante.



Portanto, para eventos extremos como o de maio de 2024, é necessário que o foco não seja exclusivo nas obras de engenharia, mas em uma união entre as diversas áreas do conhecimento que trabalham em ações de enfrentamento às inundações.

Palavras-chave: Inundações. MGB. Dragagem. Reflorestamento. Bacia hidrográfica do rio Caí. São Sebastião do Caí.



ABSTRACT

The May 2024 flood, which affected much of Rio Grande do Sul and severely impacted the river basin of the Caí River, highlighted the challenges posed by climate change and the need for integrated planning and coordinated actions to mitigate future impacts. Historically, the Caí River has experienced periods of flooding. However, since the city's foundation, the river's floodplain has been anthropized and progressively occupied by the population, leading to a coexistence between the city and floods. With the intensification of climate change, however, there has been an increase in the intensity and frequency of these events, underscoring the urgency of implementing effective solutions to address them. This study aimed to simulate the March 2024 flood in the city of São Sebastião do Caí and analyze the limits of the effects of drastic changes in the basin to reduce the impact of floods of this magnitude, such as deep dredging and full reforestation of the basin. To achieve this, the hydrodynamic module of the MGB model was used, which allows the simulation of hydrological and hydrodynamic behavior in large basins. In this study, the Caí River basin was modeled using the Inertial method. The first part of the work involved calibrating the MGB model to accurately represent the basin's hydrological response, focusing on the city of São Sebastião do Caí, and simulating the May 2024 event in a way that faithfully reflected reality. In the second part, the two extreme scenarios were compared to the flood simulation performed in the first part. The results indicated that the flood extent for the May 2024 event closely resembled the extent generated by the Hydraulic Research Institute (IPH), although with some gaps in specific areas. The depth of 17 meters recorded at the Barca do Caí stream gauge station was accurately reproduced, aligning with the values observed during the actual event. Additionally, the calculated Nash and Nash-log coefficients were deemed acceptable, indicating the model's adequacy. Regarding the simulated scenarios, dredging showed more promising results than basin reforestation. This intervention reduced the flood depth affecting the city by two meters but did not alter the flood extent, nor did it decrease the flow rates observed at the stream gauge stations. This indicates that while this alternative could reduce the impact of an extreme flood—particularly the water height in the city—it would still affect the same areas, making it not an effective solution. Furthermore, it involves high project and maintenance costs. In the reforestation scenario, there was a negligible reduction of 1 meter in flood height, but no change in the flood extent in São Sebastião do Caí, also demonstrating that it is not an effective alternative. Even considering that the simulated scenarios are an extrapolation of reality, it is important to test these extremes and their effects. This study showed that the proposed extreme interventions of dredging and reforestation would not significantly alter the impacts caused by the flood. Therefore, for extreme events such as the May 2024 flood, the focus should not be exclusively on engineering works but rather on a collaboration between various fields of knowledge working on flood mitigation actions.

Keywords: Floods. MGB. Dredging. Reforestation. Caí river basin. São Sebastião do Caí.



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CAIS DO PORTO DE SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ, AUTOR DESCONHECIDO. C. 1890. FOTOGRAFIA ORIGINAL DO ACERVO DO MUSEU HISTÓRICO VALE DO CAHY.	16
FIGURA 2 - INUNDAÇÃO DE MAIO DE 2024 EM SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ: FONTE: PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ, 2024.	18
FIGURA 3 - INUNDAÇÃO DE MAIO DE 2024, ONDE É POSSÍVEL OBSERVAR O RIO CAÍ AO NORTE DA IMAGEM. FONTE: PREFEITURA DE SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ, 2024.	18
FIGURA 4 - IMAGEM COM OS PONTOS SINALIZANDO AONDE SERIA A CONSTRUÇÃO DO CANAL E A CIDADE DE MONTENEGRO. FONTE: (SEMA/PROFILL, 2007).	20
FIGURA 5 – PRINT DO WEBSITE DO MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DA BACIA DO RIO CAÍ. FONTE: AUTORAL, 2024.	23
FIGURA 6 - LOCALIZAÇÃO DAS CIDADES DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAÍ.	26
FIGURA 7 - LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAÍ E BACIAS ADJACENTES.	27
FIGURA 8 - HLC DA BACIA DO RIO CAÍ.	29
FIGURA 9 - GRÁFICO DOS USOS DO SOLO NA BACIA DO RIO CAÍ.	29
FIGURA 10 - ESQUEMA DO FUNCIONAMENTO DO MGB. FONTE: HGE, S.D.	31
FIGURA 11 - ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E FLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NO TRABALHO.	32
FIGURA 12 - DADOS DE ENTRADA NO ANA DATA ACQUISITION DO MGB.	33
FIGURA 13 - DISPONIBILIDADE TEMPORAL DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS NO SUPER MANEJO DE DADOS.	33
FIGURA 14 - INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA.	34
FIGURA 15 - DISPONIBILIDADE TEMPORAL DOS DADOS DE VAZÃO.	35
FIGURA 16 - FERRAMENTA DAS VAZÕES OBSERVADAS COM A CORRELAÇÃO DAS MINIBACIAS COM ESTAÇÕES.	36
FIGURA 17 - MINIBACIAS E DRENAGEM GERADA PELO IPH HYDRO TOOLS.	37
FIGURA 18 - ESTAÇÕES CLIMATOLÓGICAS SELECIONADAS DO INMET.	38
FIGURA 19 - CLASSES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA.	39
FIGURA 20 - PARÂMETROS DE VEGETAÇÃO REFERENTE AO ALBEDO.	40
FIGURA 21 - MINIBACIAS SELECIONADAS PARA O SIMULAÇÃO DO CENÁRIO DE DRAGAGEM.	43
FIGURA 22 - MANCHA DE INUNDAÇÃO NA BACIA DO RIO CAÍ.	45
FIGURA 23 - MANCHA DE INUNDAÇÃO DO EVENTO DE MAIO DE 2024 NA CIDADE DE SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ.	46
FIGURA 24 - HIDROGRAMA OBSERVADO X SIMULADO PARA ESTAÇÃO 87170000 - BARCA DO CAÍ. (A) TODO PERÍODO SIMULADO, (B) PERÍODO DE JUNHO DE 2023 A JUNHO DE 2024.	47
FIGURA 25 - HIDROGRAMA OBSERVADO X SIMULADO PARA ESTAÇÃO 87160000 – NOVA PALMIRA. (A) TODO PERÍODO SIMULADO, (B) PERÍODO DE JUNHO DE 2023 A JUNHO DE 2024.	48



FIGURA 26 - HIDROGRAMA OBSERVADO X SIMULADO PARA ESTAÇÃO 87270000 - PASSO MONTENEGRO.	49
FIGURA 27 - DIFERENÇA ENTRE A MANCHA SIMULADA PARA O EVENTO DE MAIO DE 2024 E O CENÁRIO DE DRAGAGEM.	49
FIGURA 28 - DIFERENÇA DE COTA ENTRE O CENÁRIO DE DRAGAGEM E A MANCHA DE INUNDAÇÃO SIMULADA PARA 2024.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
FIGURA 29 - DIFERENÇA ENTRE COTAS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO DO EVENTO EXTREMO DE MAIO DE 2024 E O MUDANÇA DE USO DO SOLO NA BACIA.	50
FIGURA 30 - GRÁFICO COMPARANDO SIMULADO X CENÁRIO DE FLORESTAMENTO PARA ESTAÇÃO NOVA PALMIRA.	51
FIGURA 31 - GRÁFICO COMPARANDO SIMULADO X CENÁRIO DE FLORESTAMENTO PARA ESTAÇÃO PASSO MONTENEGRO.	51
FIGURA 32 - GRÁFICO COMPARANDO SIMULADO X CENÁRIO DE FLORESTAMENTO PARA ESTAÇÃO BARCA DO CAÍ.	52



LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COTAS REGISTRADAS DESDE 2016 PELA ESTAÇÃO BARCA DO CAÍ. FONTE: ANA.	17
TABELA 2 - LONGITUDE E LATITUDE DOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO..	34
TABELA 3 - ESTAÇÕES FLUVIOMÉRICAS SELECIONADAS.....	35
TABELA 4 - VAZÕES MÉDIAS E PROFUNDIDADE ASSOCIADA AOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS.	38
TABELA 5 - PARÂMETOS DE VEGETAÇÃO ADOTADOS PARA CADA HRC DA BACIA. FONTE: ADAPTADO DO MANUAL DE APLICAÇÃO DO BHO2MGB.	39
TABELA 6 - CALIBRAÇÃO DO USO DO SOLO.	42
TABELA 7 - VALORES DE VEGETAÇÃO PARA CENÁRIO DE FLORESTAMENTO DA BACIA DO RIO CAÍ.	44



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	HISTÓRICO DE EVENTOS CLIMÁTICOS NO RIO GRANDE DO SUL	15
3.2	HISTÓRICO DE EVENTOS CLIMÁTICOS EM SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ	16
3.3	PLANO DA BACIA DO RIO CAÍ	19
3.4	PLANO DIRETOR DE SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ	21
3.5	SISTEMAS DE PROTEÇÃO USUAIS NA BACIA	22
3.6	PRESPECTIVAS FUTURAS PARA BACIA DO RIO CAI A PARTIR DA CHEIA DE 2024	24
3.7	DRAGAGEM COMO MÉTODO DE AMORTECIMENTO DE CHEIAS	25
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	26
4.1	DELIMITAÇÃO DA BACIA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
4.2	HLC E USO DO SOLO	28
5	MATERIAIS E MÉTODOS	29
5.1	MODELO MGB.....	30
5.2	DADOS PLUVIOMÉRICOS E FLUVIOMÉTRICOS	32
5.3	PRÉ-PROCESSAMENTO COM IPH HYDRO TOOLS.....	36
5.3.1	<i>Dados de clima</i>	38
5.3.2	<i>Dados de vegetação</i>	38
5.4	MODELO MGB: SIMULAÇÃO E CALIBRAÇÃO.....	40
5.4.1	<i>Calibração</i>	40
5.4.2	<i>Cenário de Dragagem</i>	42
5.4.3	<i>Cenário de Cenário de Reflorestamento completo da bacia</i>	43
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
6.1	MANCHA DE INUNDAÇÃO DE 2024	44
6.2	CENÁRIO DE DRAGAGEM	49
6.3	CENÁRIO DE REFLORESTAMENTO COMPLETO DA BACIA	50
7	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55



1 INTRODUÇÃO

Conforme estudos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças no Clima - IPCC (Arias, 2021), mudanças climáticas antropogênicas causadas por emissões de gases de efeito estufa (GEE) devem resultar no aquecimento da atmosfera, em alterações no regime de chuvas, e em mudanças na frequência e magnitude de eventos hidrológicos extremos (PAIVA et al, 2024), como o ocorrido em maio de 2024 no estado Rio Grande do Sul (RS).

O evento ocorrido em maio de 2024 no estado Rio Grande do Sul (RS) atingiu direta e indiretamente uma população de aproximadamente 2,3 milhões de pessoas no RS. De acordo com dados mais atualizados da Defesa Civil do RS, quase 600 mil pessoas foram desalojadas, 70 mil foram para abrigos, cerca de 800 ficaram feridas e mais de 150 óbitos foram confirmados. As chuvas deste evento tiveram extremo volume e intensidade em curto intervalo de tempo e grande abrangência espacial. Foram observados nos pluviógrafos da ANA, CEMADEN e INMET acumulados de mais de 400 mm em menos de 2 semanas, superiores a 700 mm em muitas regiões e maiores de 1000 mm alguns casos (COLLISCHONN et al, 2025).

Atrelado as possibilidades da natureza, a falta de gestão do uso do solo desde o princípio de desenvolvimento urbano corroboram para o impacto de um evento extremo como esse. As cidades, no passado, localizavam-se próximas a rios de médio e grande portes, para uso do transporte fluvial. A parcela do leito maior ocupada pela população sempre dependeu da memória dos habitantes e da frequência com que as enchentes ocorriam. Uma seqüência de anos sem inundações é motivo para que a sociedade pressione para que haja ocupação do leito maior do rio (TUCCI, 2003).

Para minimizar os impactos socioeconômicos das inundações, pode-se utilizar medidas de controle classificadas como estruturais, quando o homem modifica o ambiente, e não estruturais, quando o homem convive com o ambiente natural e se adapta a ele. As medidas estruturais envolvem obras hidráulicas, como barragens, diques, canalização, dessassoreamento, etc. Já as medidas não estruturais são do tipo preventivo, como zonamento de áreas de inundações, sistemas de alerta ligado a defesa civil e seguros. (TUCCI, 2003).

Para definir quais medidas utilizar, uma das possibilidades é a utilização de modelagem hidrológica, uma vez que é eficaz para a realização de previsões, estudos sobre efeitos de mudanças climáticas e de uso do solo, análises de disponibilidade de água e apoio à tomada de decisão, entre outras aplicações (FAN, COLLISCHONN, 2013). Um modelo hidrológico e hidrodinâmico que representa o processo de transformação de chuva em vazão de forma distribuída na bacia hidrográfica é o Modelo de Grandes Bacias (MGB), desenvolvido por Collischonn et al. (2007) no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Este modelo foi utilizado neste estudo a fim de simular o evento histórico de maio de 2024 com foco na cidade de São Sebastião do Caí e avaliar a eficiência de medidas estruturais e não estruturais na bacia, como dragagem do rio Caí próximo a cidade, e reflorestamento da bacia, uma vez que há a discussão da cobertura vegetal como forma de minimizar os impactos de cheias extremas.



2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho foi fazer prognósticos sobre a mitigação dos impactos da cheia de maio de 2024 que ocorreu no Rio Grande do Sul e atingiu a cidade de São Sebastião do Caí, analisando o máximo impacto de alterações drásticas na bacia, a fim diminuir as consequências de cheias dessa magnitude.

2.2 Objetivos Especificos

Dentre os objetivos específicos do presente trabalho, cita-se:

- Produzir mancha de inundação na bacia do Rio Caí;
- Testar alternativa de dragagem de alguns trechos de rio;
- Testar alternativa de reflorestamento da bacia.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Histórico de eventos climáticos no Rio Grande do Sul

O Rio Grande do Sul é um estado brasileiro que sofre tanto com estiagens quanto com inundações. Por estar mais ao sul da América Latina, tem interferências com as massas de ar frio que vem da Antártica e grande umidade advinda dos “rios flutuantes” que vêm da região da Amazônia, sendo um ponto de encontro de sistemas tropicais e sistemas polares (CNN Brasil, 2024). Porém, a instensidade e frequência desses eventos extremos estão sendo alterados pelas mudanças climáticas, que intensificam fenômenos naturais como o El Niño e La Niña, sendo o El Niño o evento que provoca maiores chuvas e o La Niña o evento que reduz os volumes de chuvas do estado.

Segundo o levantamento realizado por Reckziegel (2007) sobre os desastres desencadeados por eventos naturais adversos no estado do Rio Grande do Sul, entre 1980 e 2005, foram registradas 7.080 ocorrências de desastres naturais, sendo 2.196 relacionados a dinâmica fluvial, com 1.258 enchentes, 925 enxurradas e 13 erosões de margem; 1.344 de vendavais, 264 precipitações de granizo, 357 vendavais acompanhados de precipitação de granizo, 6 tornados, 5 furacões e 2.836 estiagens; além de 72 eventos de deslizamentos.

Ademais, o Departamento de Planejamento Governamental, vinculado à Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do Estado do Rio Grande do Sul, desenvolveu um estudo sobre as ocorrências de desastres naturais no período de 2003 a 2021 (RIO GRANDE DO SUL, 2022). Referente aos movimentos de massa no período analisado, foram registradas 4 ocorrências. Já alagamentos e inundações, totalizaram 256 ocorrências, sendo que a partir de 2010 foram os anos com maiores concentrações de ocorrência de inundação (RIO GRANDE DO SUL, 2022, p. 16). No período de 2017 a 2021, cerca de 31.414 pessoas foram desalojadas de suas residências e uma pessoa morreu em decorrência a um desses eventos extremos. Referente a enxurradas, que são eventos naturais com grande volume de precipitação em uma bacia e ocorrem geralmente em regiões com relevo acidentado, no período de 2003 a 2021, foram registrados 801 eventos no estado.

Históricamente, o Rio Grande do Sul, sofre também com estiagem, como nos anos de 2021 até metade do ano de 2023, em que registrou-se uma estiagem histórica, fruto de um período longo de La Niña, com precipitações mínimas por mais de dois anos (CNN Brasil, 2024).

Já em 2023, ocorreram três grandes eventos de cheia em junho, setembro e novembro, resultando em 75 mortes. Em junho, classificou-se o evento como ciclone extratropical com grandes impactos na região metropolitana de Porto Alegre, no litoral norte e em parte da serra graúcha, afetando cerca de 2 milhões de pessoas, com 3,2 mil pessoas desabrigadas e 4,3 mil desalojadas em 40 cidade do estado. Neste evento, 16 pessoas morreram (G1, 2024).

Já em setembro de 2023, houve uma nova inundação no estado, atingindo principalmente o vale do Taquari, que resultou em 54 mortes no RS, sendo considerado até então, o maior desastre natural da história do Rio Grande do Sul (G1, 2023). Em novembro, dois meses após a inundação, o estado registrou novamente fortes chuvas que alagaram diversas cidades, como São Sebastião do Caí. Segundo o Governo do Estado, quase 700 mil pessoas foram afetadas direta e indiretamente, sendo que 221 municípios reportaram danos e ocorrências (RIO GRANDE DO SUL, 2024).

3.2 Histórico de eventos climáticos em São Sebastião do Caí

A cidade de São Sebastião do Caí localiza-se à margem esquerda do rio Caí, sendo que seu desenvolvimento urbano se deu no fim do século XIX devido à instalação de um porto fluvial no último trecho navegável do rio Caí. Além disso, em 1875, foi criada a sede de poder municipal em São Sebastião do Caí, que aumentou a malha urbana e a diversificação da população. A criação da sede visava dar subsídio político para a principal conexão entre a estrada Rio Branco, que ia até Caxias do Sul e suas colônias italianas, e o curso d'água do rio Caí, que deságua no rio Guaíba, em Porto Alegre. Dessa maneira, o porto oferecia um acesso mais fácil de escoamento de produtos agrícolas das comunidades alemãs que estavam estabelecidas na bacia (FLORES-COELHO, 2023).



Figura 1 - Cais do porto de São Sebastião do Caí, autor desconhecido. c. 1890. Fotografia original do Acervo do Museu Histórico Vale do Caí.

O rio Caí sempre teve períodos de inundação, porém, a partir da fundação da cidade, a área de várzea do rio foi antropizada com a construção de ruas, casas, locais de trabalho, depósitos e fábricas (FLORES-COELHO, 2023). Segundo o estudo de Oliveira et al. (2010, p.414) as enchentes atingem a área urbana de São Sebastião do Caí a cada 1,5 ano. Porém, nem todas as enchentes são caracterizadas como episódios críticos, sendo assim classificadas apenas quando atingem mais de 11 metros de altura. De acordo com um estudo realizado pelo estado (RIO GRANDE DO SUL, 2014, p. 14), tais episódios críticos, ou seja, com cota acima de 11 m, atingem São Sebastião do Caí a cada 3,4 anos. Entretanto, ao analisar os dados de 2000 até 2014, o estudo supracitado observa a ocorrência de 10 eventos críticos, resultando na ocorrência de um evento a cada 1,4 ano, mostrando assim uma intensificação na ocorrência de enchentes.

O sistema de alerta do nível do rio Caí começa a ser acionado quando a altura da água atinge 7 metros, ultrapassando a cota de atenção de 5 metros. Segundo o Sistema Geológico o Brasil (SGB),

quando o rio Caí ultrapassa 10,50 metros de altura, o leito do rio começa a invadir várias quadras da cidade, sendo essa considerada a cota de inundação. Qualquer enchente próxima da marca de 13m atinge, ao menos, 40% do território urbano da cidade. Acima de 14 m, 60% do território urbano de São Sebastião do Caí é atingido (FLORES-COELHO, 2023).

Entre os anos de 2007 e 2009, a cidade de São Sebastião do Caí foi atingida cinco vezes por inundações, sendo que as últimas três ocorreram num intervalo de apenas 45 dias. Em julho de 2011, uma nova inundação atingiu 10 mil pessoas na cidade (RIO GRANDE DO SUL, 2014). No mesmo ano, o rio Caí atingiu a cota de 14,80 m em São Sebastião do Caí, superando a última grande enchente que tinha sido em 2007, quando o nível do rio chegou a 14,70m. A cheia atingiu 60% da cidade e tirou de casa mais de 5 mil pessoas. Após 2011, a cidade foi atingida também em 2013 com a cota de 13,88m, 2015 com 13,60m, 2016 com 14,66m e em 2020 com 14,40m (FLORES-COELHO, 2023). Mesmo sendo uma cidade que é constantemente atingida por inundações, seu histórico é precário e poucas matérias jornalísticas são encontradas falando das inundações a partir de 2016.

Para identificar o histórico das cotas máximas na última década, foram obtidos dados de nível da estação fluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA), a partir da estação fluviométrica convencional Barca do Caí (87170000), localizada em São Sebastião do Caí com intuito de mapear todos os níveis observados acima de 11 m (evento crítico). A tabela abaixo apresenta os níveis de cota máximo a partir de dados consistidos e brutos.

Tabela 1 - Cotas registradas desde 2016 pela estação Barca do Caí. Fonte: ANA.

Data	Cota máxima (m)	Tipo de dado
01/10/2016	14,35	Consistido
01/05/2017	12,40	Consistido
01/06/2017	12,45	Consistido
01/11/2019	11,69	Consistido
01/07/2020	13,01	Consistido
01/06/2023	14,12	Consistido
01/07/2023	12,08	Consistido
01/09/2023	13,10	Consistido
01/11/2023	15,49	Consistido

A partir de 2024, os dados disponíveis para esta estação fluviométrica são telemétricos, ou seja, medidos automaticamente a cada 15 minutos. Assim, foi possível observar a evolução da maior cheia que já atingiu a cidade de São Sebastião do Caí, em maio de 2024. No dia 30 de abril de 2024, o nível do rio Caí atingiu a cota de 14,25 m e chegou a uma vazão de $1.270,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Do dia 30 de abril ao dia 05 de maio não há registro de medições pela ANA visto que as estações foram danificadas, porém o monitoramento Serviço Geológico do Brasil (SGB), registrou em 02 de maio o nível recorde histórico da cidade de 17,6m.



Figura 2 - Inundação de maio de 2024 em São Sebastião do Caí: Fonte: Prefeitura Municipal de São Sebastião do Caí, 2024.



Figura 3 - Inundação de maio de 2024, onde é possível observar o rio Caí ao norte da imagem. Fonte: Prefeitura de São Sebastião do Caí, 2024.



No dia 05 de maio, o nível chegou a 12m, permanecendo na faixa entre 10m e 12m até o dia 11 de maio, quando atingiu 15,35m com uma vazão de $1.451,18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. No dia 15 de maio, o rio Caí chegou aos 15,80m, sendo registradas as três maiores cheias da história em apenas 6 meses (novembro de 2023 a maio de 2024).

Além das áreas ribeirinhas, que normalmente são atingidas pelas cheias, dessa vez o centro da cidade e várias áreas que nunca haviam sido inundadas antes foram gravemente afetadas, além de muitas residências, as farmácias, os principais supermercados, indústrias, escolas, biblioteca pública, a secretaria da saúde, da assistência social, de obras, postos de saúde e grande parte do comércio caiense (Prefeitura de São Sebastião do Caí, 2024).

Na tese de Coelho (2023), é abordada historicamente toda construção da cidade em volta do rio Caí e são compiladas informações importantes sobre o histórico das inundações em São Sebastião do Caí até novembro de 2023, quando houve o registro do maior nível do rio Caí em 145 anos. O autor também alerta sobre as tendências de aumento na intensidade e recorrência das grandes inundações na cidade. Fato curioso é que apenas 6 meses após a publicação do trabalho, a cidade registra novamente, uma cheia histórica, ultrapassando a de novembro de 2023.

3.3 Plano da Bacia do rio Caí

Em acordo com a Lei 10.350/1994 de 30 de dezembro 1994, que estabelece a Política Estadual de Recursos Hídricos, é desenvolvido o Plano da Bacia do Rio Caí em 2007 pela empresa Profill, contratada pela Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA), através do Departamento de Recursos Hídricos (DRH). O Plano consiste em três fases: (A) diagnóstico e prognóstico da situação atual dos recursos hídricos; (B) compatibilização e articulação dos usos múltiplos das águas e; (C) formulação dos planos de ações.

Na Bacia Hidrográfica do rio Caí, o processo de planejamento caracteriza-se pela importância em responder às questões e aos dilemas que demandam decisões e soluções a gestão do uso da água, como a disponibilidade desta com a qualidade ambiental requerida pela sociedade e pelos ecossistemas, assim como a gestão dos eventos extremos sobre o território da bacia, especialmente, as cheias urbanas (SEMA/DRH/FEPAM/Comite Cai, s.d).

Com o foco em analisar o Plano quanto à suas ações referentes ao diagnóstico e às proposições de enfrentamento às cheias, é notória a preocupação do Comitê com o controle e mitigação das enchentes, apontando como um dos aspectos mais críticos no que concerne aos recursos hídricos da bacia. Desse modo, na fase A do Plano, é discutido sobre o problema na cidade de Montenegro, apresentando a proposição de construção de um canal ligando o ponto A ao ponto B do rio Caí (Figura 4), com o objetivo de diminuir o risco de enchente na cidade.



Figura 4 - Imagem com os pontos sinalizando aonde seria a construção do canal e a cidade de Montenegro.
Fonte: (SEMA/PROFILL, 2007).

Entretanto, estudos realizados simulando o impacto do canal extravasor mostram que para inundações maiores, não diminuíram os impactos na cidade, além de ter impactos relevantes na morfologia fluvial, qualidade de água e nos ecossistemas do rio Caí. Com isso, é recomendada soluções não estruturais, como remoção de famílias ribeirinhas, que seria mais viável economicamente do que a construção do canal. Porém, as cidades do trecho baixo do rio Caí foram construídas estruturalmente e culturalmente a partir de suas águas, sendo o convívio com o rio parte da memória e cultura dos habitantes da região. Portanto, entende-se que tal solução é simplista e impacta a esfera social, com inúmeras adversidades para a simples remoção das famílias desses locais.

No que diz respeito aos recursos hídricos, a disponibilidade hídrica superficial e a caracterização hidrometeorológica da bacia, mostraram que as maiores médias anuais de precipitação ocorrem na porção nordeste, entre Nova Petrópolis e São Francisco de Paula, situadas na cabeceira da bacia. Referente a qualidade da água superficial, em grande parte da bacia, os rios e arroios são enquadrados como Classe 3 e Classe 4, conforme Resolução CONAMA 357/2005.

Após a fase A, com o diagnóstico da qualidade, quantidade e usos da água e a fase B com enquadramento, discussões e definições da qualidade da água que a bacia pretende para o futuro, houve o desenvolvimento da fase C. Esta estabeleceu o plano de ações para alcançar as metas de enquadramento, definição de diretrizes de outorga de direito e de uso, além dos estudos e definições de modelos de cobrança pelo uso da água, finalizada no ano de 2015. Foram 8 anos desenvolvendo o Plano de Bacia completo, que teve desde seu início a participação da comunidade e do Comitê.

No plano de ações, foram definidas ações prioritárias, como: consolidação da outorga, implementação da cobrança, compensação por serviços ambientais, monitoramento qualitativo e quantitativo de água, adequação do lançamento industrial, identificação, conservação e recuperação de APPs, entre outras. Porém, o zoneamento de áreas inundadas, ampliação e operação de sistemas de alerta contra cheias, ações emergenciais para eventos críticos e ações para minimização dos efeitos



das cheias não estão listados como ações prioritárias, mesmo sendo pontuado desde sua fase A, como uma problemática da bacia (SEMA, 2007).

Após oito anos da finalização do plano, o Comitê de Gerenciamento da BH do rio Caí, publica a Resolução CBHCAÍ n. 07/2023, alegando urgência e imprescindibilidade da instituição do instrumento de Cobrança Pelo Uso dos Recursos Hídricos para viabilizar os investimentos necessários para atingir as metas definidas no plano. Nessa resolução, consta que uma relevante parcela das diretrizes e ações que foram previstas no plano não foram implementadas até então devido à insuficiente disponibilização de estrutura técnico-administrativa, operacional e de recursos financeiros. Além disso, até o momento da resolução, não havia indicadores positivos sequer para as metas intermediárias de enquadramento das águas, havendo até situações de piora da qualidade e/ou quantidade em certos trechos e tributários.

3.4 Plano Diretor de São Sebastião do Caí

A Lei Complementar nº 003, de 10 de maio de 2023, estabelece os princípios, diretrizes, políticas, programas, projetos e outros instrumentos do desenvolvimento do município de São Sebastião do Caí, revoga as leis municipais nº 2.802, de 09 de outubro de 2006 e nº 2.970, de 19 de dezembro de 2008 e dá outras providências. A presente lei institui o Plano Diretor de Uso e Ocupação do Solo no Município de São Sebastião do Caí, com fundamento na Constituição da República; na Lei Federal nº 10.257, de 10 de julho de 2001 Estatuto da Cidade; na Constituição do Estado do Rio Grande do Sul e na Lei Orgânica Municipal.

Segundo o plano diretor, Capítulo II - Proteção Ambiental, Art. 15, é definido que as áreas que são sujeitas a inundações, definidas no Plano Diretor, terão um regime urbanístico diferenciado, respeitando a cota de cheia para fins de ocupação e uso de solo, a partir das macrozonas definidas no plano. Além disso, a Seção II - Política Municipal de Drenagem, Preservação dos Recursos Hídricos e Recuperação e Conservação da Vegetação Nativa objetiva a criação e desenvolvimento do Plano Municipal de Drenagem, visando instalar sistemas de infraestrutura verde de modo a possibilitar a utilização e a infiltração das águas das chuvas e integrar o sistema de saneamento ao de drenagem. Até o momento da publicação do presente trabalho, o município ainda não publicou seu Plano Municipal de Drenagem, tendo somente o Plano Municipal de Saneamento Básico, no qual consta que o município possui uma Planta de Drenagem Urbana, entretanto não foi possível acessá-la. Além disso, é pontuado que o “município carece de projetos mais atualizados e informações referentes às cotas de assentamento das tubulações e os locais exatos de lançamento.”

Referente ao uso e ocupação do solo, o Art 10., parágrafo IV, define como uma diretriz de proteção ambiental para o desenvolvimento urbano e rural do município a proteção de modo preferencial da vegetação das Áreas de Preservação Permanente (APP), o que pode ser interpretado como algo optativo e não de cunho obrigatório, conforme Lei Federal nº 12.651/2012. Além disso, ao comentar sobre as APPs situadas em topos de morro e das encostas, no Art. 16 do Plano Diretor, é definido que essas áreas terão proteção ambiental especial, possuindo alta restrição de ocupação e uso, a fim de preservar o meio ambiente. Desta forma, há divisões de importância das áreas de APPs da cidade, sendo mais restritivo a topos de morro/encosta e mais flexível às áreas de proteção permanente



situadas nas margens dos rios.

O plano diretor define a macrozona ambiental, com as seguintes atividades proibidas: industrial, comercial, residencial multifamiliar de qualquer natureza e loteamentos. Entretanto, nas Zonas Especiais de Interesse Ambiental (ZEIA) estão autorizadas as atividades residenciais multifamiliares, atividade residencial, loteamento e supressão vegetal ou movimentação de terra, havendo divergência entre as atividades proibidas. Além disso, não é apresentado mapa com as macrozonas, somente um mapa com as zonas já divididas.

3.5 Sistemas de proteção usuais na bacia

Para a gestão da inundação de forma eficiente é necessária a combinação de estratégias que atuem nas causas (mitigação) e nos efeitos (adaptação) das inundações. Neste contexto, medidas adaptativas permitem que a população conviva com as inundações sem a ocorrência de desastres e medidas mitigadoras limitam a área de influência da inundação e também a área de influência da ocupação urbana (VON AHN et. al, 2018).

A gestão de áreas de risco de inundação envolve medidas estruturais, que são obras de proteção ou de aumento da capacidade de escoamento da cheia, e não-estruturais, voltadas para mitigação de riscos e prevenção do agravamento dos prejuízos com inundações. As medidas não-estruturais contemplam o disciplinamento do uso do solo em áreas de risco de inundação, visando reduzir os impactos por meio de uma melhor convivência da cidade com o risco. Medidas não-estruturais não resolvem problemas consolidados, mas permitem reduzir o agravamento da situação no futuro (LARENTIS et. al, 2020).

As medidas estruturais são obras de engenharia implementadas para reduzir o risco de enchentes. Segundo Tucci (2005) elas podem ser divididas em extensivas ou intensivas. As medidas estruturais extensivas são aquelas que procuram modificar a estrutura física da bacia. As principais ações deste tipo de medida são alterações na cobertura vegetal e uso do solo — visando à redução dos picos de cheia — e o controle de erosão, para diminuir os índices de assoreamento. Já as medidas estruturais intensivas, por sua vez, agem diretamente nos cursos hídricos, podendo ser divididas naquelas que aceleram, retardam ou facilitam o desvio do escoamento para outras áreas.

As medidas não estruturais podem minimizar os danos e reduzir os custos de proteção de áreas urbanas, visto que elas são do tipo preventivas e partem do princípio de “conviver” com as inundações (FADEL, Amanda W., 2015). De acordo com Tucci (2007), as principais intervenções não estruturais correspondem ao zoneamento das áreas inundáveis, construções à prova de enchentes, sistemas de previsão e alertas e seguros de inundação.

Sob esse viés, em 2011, foi implementado o sistema de alerta hidrológico na bacia do rio Caí pela Companhia de Pesquisas de Recursos Mineiras (CPRM), através do Serviço Geológico do Brasil (SGB). A rede de monitoramento é constituída de 9 pontos, com estações telemétricas que transmitem em tempo real dados de chuva e níveis dos rios, associada a um sistema de recepção de dados e previsão de níveis. O Sistema de Alerta prevê, com antecipação de 10 horas, o nível que o rio Caí atingirá nas cidades gaúchas de São Sebastião do Caí e Montenegro, cidades que são mais atingidas pelas inundações na bacia (SGB, s.d). No atual momento, 9 estações estão funcionando em tempo real

e é possível que qualquer cidadão acesse os dados em tempo real para acompanhar o nível do rio Caí, conforme Figura 5.

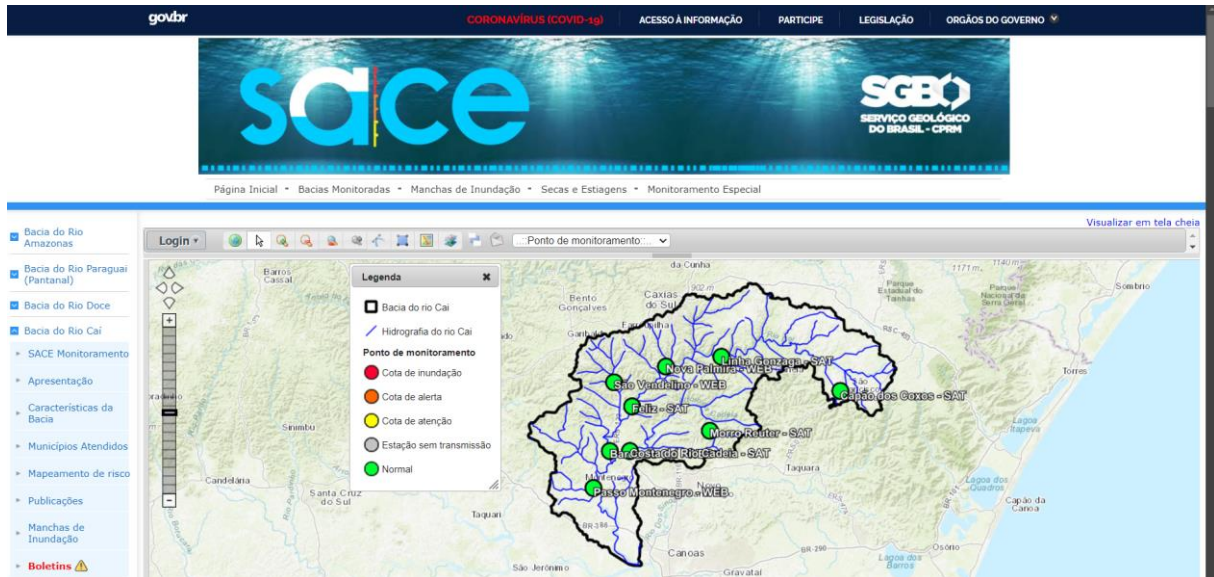


Figura 5 – Print do website do monitoramento em tempo real da bacia do rio Caí. Fonte: Autoral, 2024.

Segundo Oliveira et. al (2010), há uma região, denominada de Várzea do Pareci que, em eventos extremos com cota maior de 14 metros, ocorre uma junção de duas áreas de inundação (conexão da várzea do arroio Maratá com os terraços aluviais do rio Caí). Este fenômeno cria uma extensa ilha, que isola o município de Pareci Novo das cidades vizinhas. Para evitar esse isolamento, a estrada estadual RS-124 foi alteada em 1 metro em diversos trechos, o que pode acabar direcionando maiores volumes de água para cidade de São Sebastião do Caí.

Em 2013, a Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional (Metroplan) desenvolveu o estudo denominado “Estudo de alternativas para minimização do efeito das cheias no trecho baixo do rio Caí”, com foco nos municípios de: Harmonia, Montenegro, Pareci Novo e São Sebastião do Caí. O referido estudo apresenta diagnóstico detalhado sobre a estrutura da bacia com definições sobre as possíveis soluções para cada município de acordo com a viabilidade técnica e econômica. As soluções vão desde medidas estruturais, como construção de corta-rio associado ao dique de proteção em Montenegro, implantação de diques em São Sebastião do Caí, Pareci Novo, Harmonia, e transformação da ERS-124 em dique. Também há medidas não estruturais, como implantação do sistema de alertas e plano de zoneamento das áreas de enchente.

Além disso, em 2017, o Conselho Regional de Desenvolvimento Vale do Caí (COREDE Vale do Caí), desenvolveu o Plano Estratégico Participativo de Desenvolvimento do COREDE Vale do Caí 2015-2030, visando definir uma visão de futuro para a região, bem como ações estratégicas que conduzam ao desenvolvimento e à sustentabilidade. Nele, são apresentados indicadores econômicos positivos e de qualidade de vida elevada. No entanto, na análise realizada pelo Plano, foi verificado aspectos que merecem intervenções rápidas, destacando a necessidade de uma atuação imediata na prevenção às enchentes que afetam municípios da região anualmente, causando enormes prejuízos econômicos e sociais.

Por fim, apesar dos estudos focados no desenvolvimento da região e no enfrentamento das

inundações, somente medidas não estruturais foram realizadas, como o zoneamento de áreas inudáveis através do Plano Diretor da cidade de São Sebastião do Caí e a implantação do sistema hidrológico de alertas descrito anteriormente.

3.6 Perspectivas futuras para bacia do rio Caí a partir da cheia de 2024

A inundação de maio de 2024, que atingiu grande parte do Rio Grande do Sul e afetou drasticamente a bacia do rio Caí, evidenciou não somente os desafios impostos pelas mudanças climáticas, mas também a necessidade de planejamento integrado e ações coordenadas para mitigar os impactos futuros. Entre as consequências desse evento, destaca-se a vulnerabilidade das comunidades ribeirinhas e da infraestrutura local, evidenciando a carência de gestão no enfrentamento às inundações, bem como no controle do uso do solo e da ocupação urbana.

Segundo Tucci (2003), em algumas cidades onde a frequência de inundação é alta — como é o caso das cidades localizadas na parte baixa da bacia do rio Caí — as áreas de risco são ocupadas por subabitações, porque representam espaço urbano pertencente ao poder público ou desprezado economicamente pelo poder privado. A defesa civil é, constantemente, acionada para proteger essa parte da população. A questão com a qual o administrador municipal depara-se, nesse caso, é que, ao transferir essa população para uma área segura, outros se alojam no mesmo lugar, como resultado das dificuldades econômicas e das diferenças sociais.

Como consequência, a população pressiona seus dirigentes por soluções do tipo estrutural, como canalização, barragens, diques, etc. Essas obras, em geral, têm um custo que os municípios e, muitas vezes, os Estados, não têm condições de suportar (TUCCI, 2003). Mesmo assim, a construção de diques, corta-rio (canal extravasor) e estações de bombeamento são as principais alternativas para as cidades de Harmonia, Pareci Novo, São Sebastião do Caí e Montenegro, soluções propostas pela Metroplan para as cheias na região gaúcha. (FATONOVO, 2024; BdF, 2024).

Entretanto, o presidente do Comitê de Bacia do Rio Caí, Rafael Altenhofen, critica a retomada de projetos de contenção de enchentes feitos a partir do estudo Metroplan (2013). Ele destaca que o estudo está incompleto e não oferece garantias de segurança à população, além de não contemplar a bacia hidrográfica como um todo, não envolver o comitê de bacia no processo e não incorporar projeções de mudanças climáticas futuras nos cálculos dos Tempos de Retorno (TRs) (BdF, 2024).

O desassoreamento do rio Caí e de arroios também está no radar dos municípios, principalmente São Sebastião do Caí, que enviou um projeto para o governo do estado no mês de agosto de 2024 propondo obras de desassoreamento. Entretanto, segundo entrevista realizada para o Correio de Povo (2024), o prefeito Júlio Campani pontua que a responsabilidade do desassoreamento do rio Caí é do Governo Federal e Estadual, sendo competência do município a limpeza dos arroios. Além disso, ele também reforça a urgência dos trabalhos para implantação das galerias pluviais na ERS 124. A obra tem como objetivo a construção de 5 galerias ao longo de 7 quilômetros para permitir um escoamento maior da água para as varzeas do rio Caí em período de cheia, pois quando a estrada foi construída não foi pensado que a mesma se tornaria um dique.

Desta maneira, conclui-se que apesar deste evento extremo ter ocorrido em 2024, buscam-se alternativas propostas há 10 anos. Essa situação evidencia problemas de gestão e aplicação do plano



de ações em especial quanto aos efeitos das mudanças climáticas, a dificuldade de se pensar em sistemas de proteção em diferentes cidades da bacia e a necessidade de estudos técnicos integrados.

3.7 Dragagem como método de amortecimento de cheias

Atividades antrópicas em centros urbanos aumentam a produção de sedimentos através de construções civis, limpeza de terrenos para novos loteamentos, construção de ruas, avenidas e rodovias entre outras fontes. Em bacias rurais, o cultivo do solo com praticas convencionais deixa o solo periodicamente exposto aumentando a probabilidade de produção de sedimentos através do escoamento superficial. A camada superficial do solo tem a estrutura alterada, tornando-se menos resistente à erosão (TUCCI & COLISCHONN, 1998).

Como os rios da bacia do presente estudo são hidraulicamente rápidos, marcados por inundações de curta duração e com grande capacidade erosiva relacionada com a intensidade de chuvas, gera-se uma grande disposição de sedimentos nos rios. Assim, os impactos das inundações são potencializados em função da ocupação das margens de rios e das planícies de inundação, da degradação das margens e do assoreamento dos rios.

Diante disso, surge como alternativa o método de dragagem, que consiste em retirar os sedimentos depositados no rio, a fim de aprofundar o rio e permitir que um maior volume de água passe no rio sem extrapolar para fora da calha. Essa alternativa é amplamente discutida tanto em bacias rurais quanto urbanas, porém sempre atreladas aos desafios envolvidos, como altos custos da operação, a necessidade de uma área para depositar o material dragado, a degradação das margens e as interrupções no trânsito que ocorrem se o material é retirado por caminhões. Além dos impactos físicos, o transporte de sedimentos traz consigo a carga de poluentes agregados aos sedimentos. A associação de poluentes tóxicos com materiais finos produz redução da qualidade da água (TUCCI & COLISCHONN, 1998).

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 Bacia Hidrográfica do rio Caí

A Bacia Hidrográfica do Rio Caí está situada no noroeste do estado do RS entre as coordenadas geográficas 29°06' a 30°00' de latitude Sul e 50°24' a 51°40' de longitude Oeste. Faz fronteira a Oeste e Norte com a bacia Taquari-Antas, ao Sul com a Bacia Baixo Jacuí e a Leste com bacia dos Sinos, fazendo parte da bacia hidrográfica do Guaíba (Figura 6).

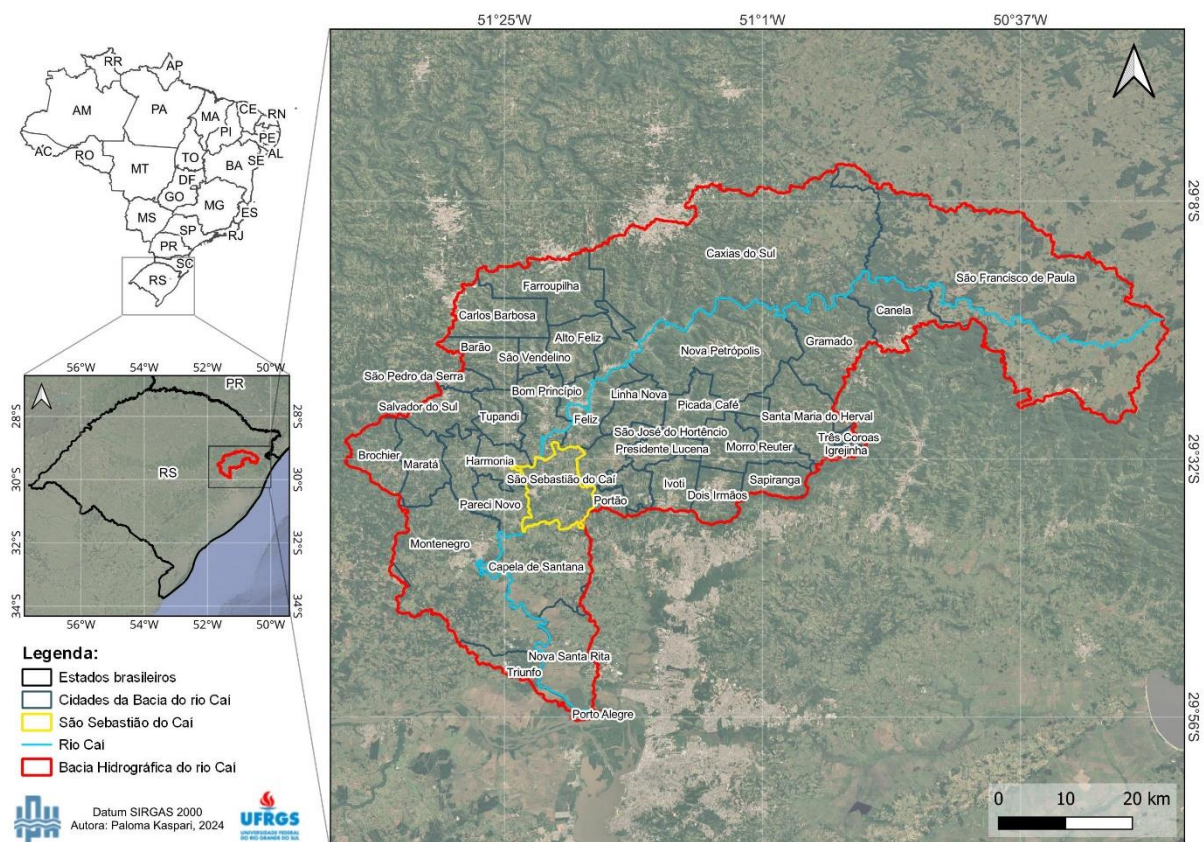


Figura 6 - Localização das cidades da bacia hidrográfica do rio Caí.

Sua população é estimada em 656.577 habitantes (2020), sendo 566.903 habitantes em áreas urbanas e 89.673 habitantes em áreas rurais (SEMA [s.d.]). A bacia está situada nas províncias geomorfológicas Planalto Meridional e Depressão Central, com altitude variando de 1.000 m, onde está situada a nascente do rio Caí, no município de São Francisco de Paula, a 2 m de altitude em relação ao mar.

Do ponto de vista hidrográfico, a Bacia do Rio Caí caracteriza-se por apresentar um curso de água principal (Rio Caí), dividido em alto, médio e baixo Caí, e alguns afluentes de maior porte, como, por exemplo, do trecho alto para o trecho baixo: Arroio Piaí, Arroio Forromeco, Arroio Cadeira e Arroio Maratá. Além disso, existe também um conjunto de barramentos, ou seja, Barragem do Salto, Blang e Divisa (SEMA, 2007).

A Bacia Hidrográfica do Rio Caí está situada no noroeste do estado do RS entre as coordenadas

geodésicas 29°06' a 30°00' de latitude Sul e 50°24' a 51°40' de longitude Oeste. Faz fronteira a Oeste e Norte com a bacia Taquari-Antas, ao Sul com a Bacia Baixo Jacuí e a Leste com bacia dos Sinos, fazendo parte da bacia hidrográfica do Guaíba.

A delimitação da bacia foi realizada através de um aplicativo do Google Earth Engine, desenvolvido pelo grupo de pesquisas Hidrologia de Grande Escala (HGE) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em parceria com a Agência Nacional de Águas e Sanamento Básico (ANA), chamado BHO Data Acquisition Tool Kit. Nesse aplicativo, foi utilizado Base Hidrográfica Atlas-Estudos (BHAEE) na escala 1:250.000 produzida pela ANA e o Modelo Digital de Terreno para a América Latina (ANADEM) com resolução espacial de 30 metros desenvolvido pelo IPH e pela ANA (Figura 9). Com essas informações e indicando o exutório da bacia do rio Caí, foi possível gerar a delimitação da bacia, conforme Figura 7.

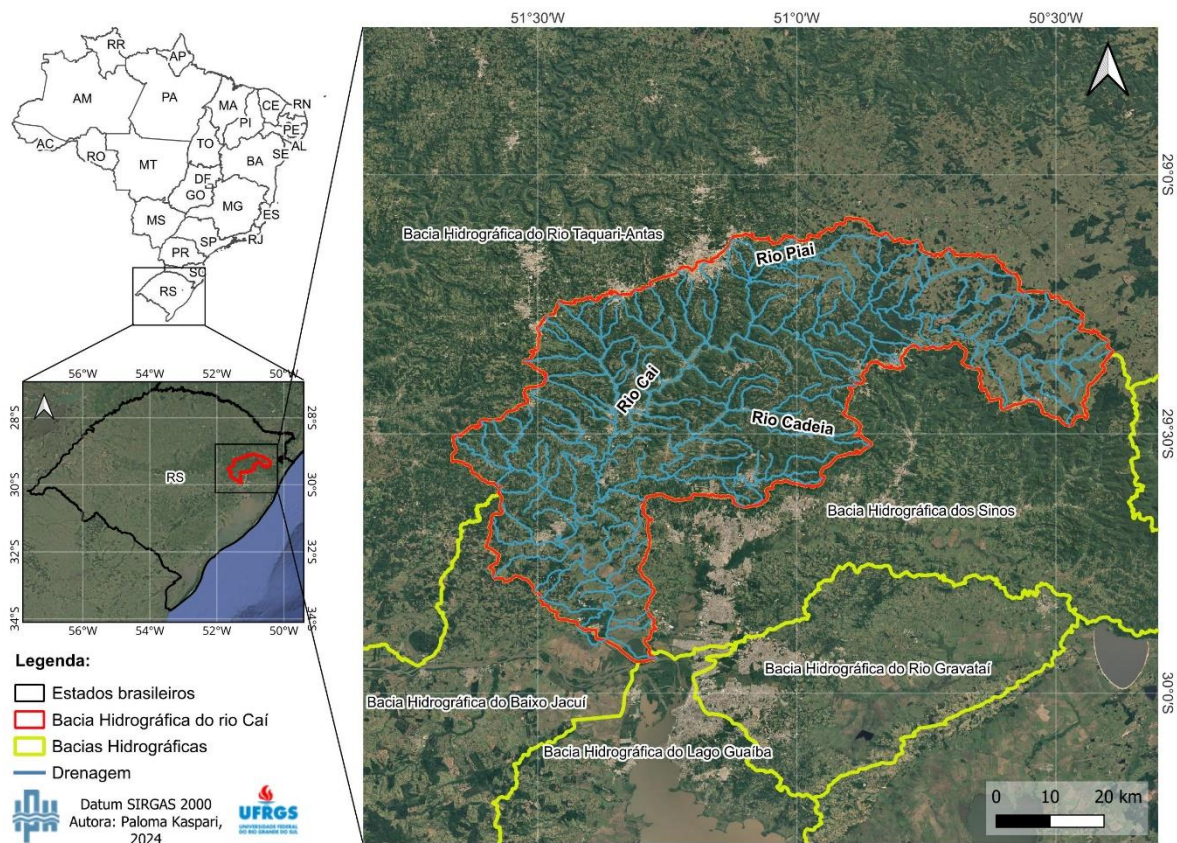


Figura 7 - Localização da bacia hidrográfica do rio Caí e bacias adjacentes.

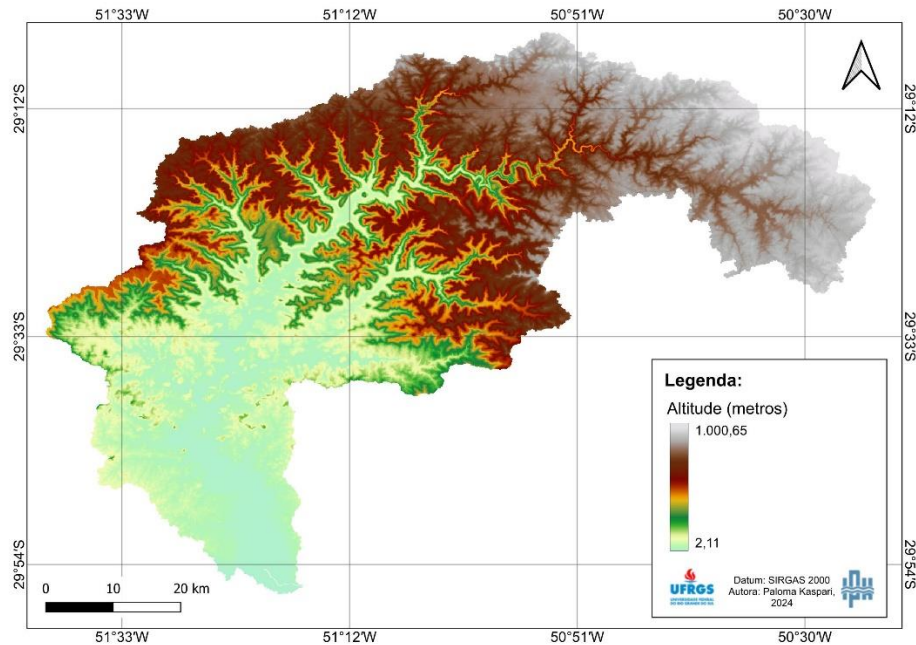


Figura 8: Modelo digital de elevação da bacia.

4.2 HLC e Uso do solo

Como uso do solo da bacia, foi utilizado o Hydrological Landscape Classes (HLC), que são as Classes de Paisagens Hidrológicas geradas a partir do BHO2MGB ToolKit. O cálculo e processamento do HLC combinam informações topográficas e hidrológicas, permitindo representar atributos relevantes para modelagem hidrológica do MGB. Leva-se em consideração a declividade do terreno que indica quais são as áreas declivosas/planas e o arquivo HAND (Height Above Nearest Drainage) que indica quais são as áreas inundáveis da bacia. A declividade é calculada pixel a pixel, considerando desnível entre o pixel e seus vizinhos, ou seja, não é relacionada com a declividade do rio em si, mas a declividade de toda a bacia. Já o uso do solo da bacia, é gerado a partir do MapBiomass. Tudo isso combinado, gera-se o HLC desejado. Para a bacia do rio Caí, obtive o HLC apresentado na Figura 9.

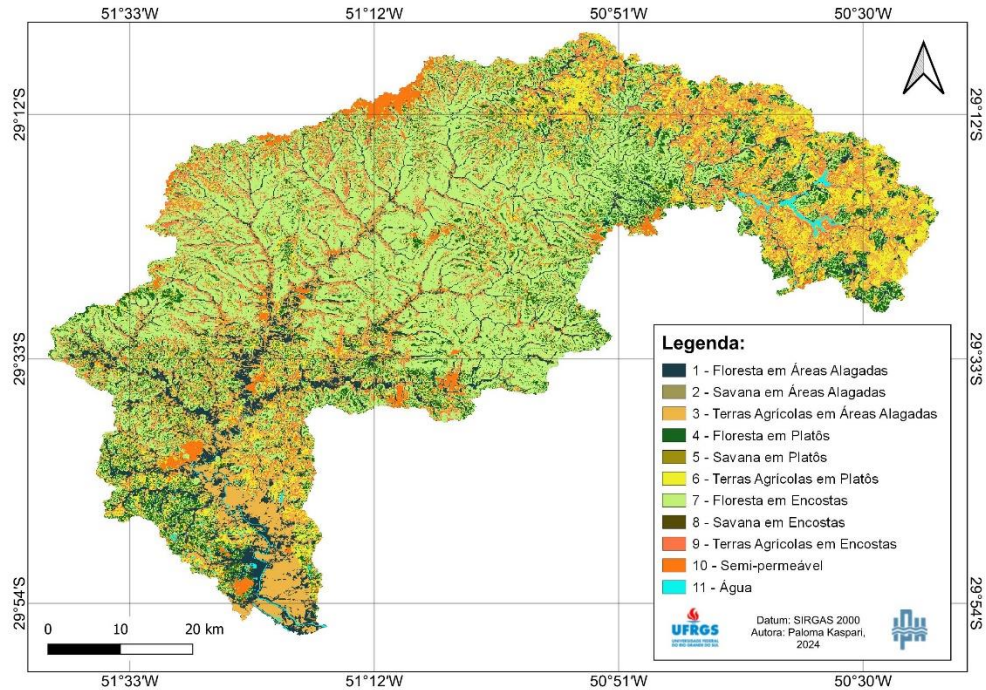


Figura 9 - HLC da bacia do rio Caí.

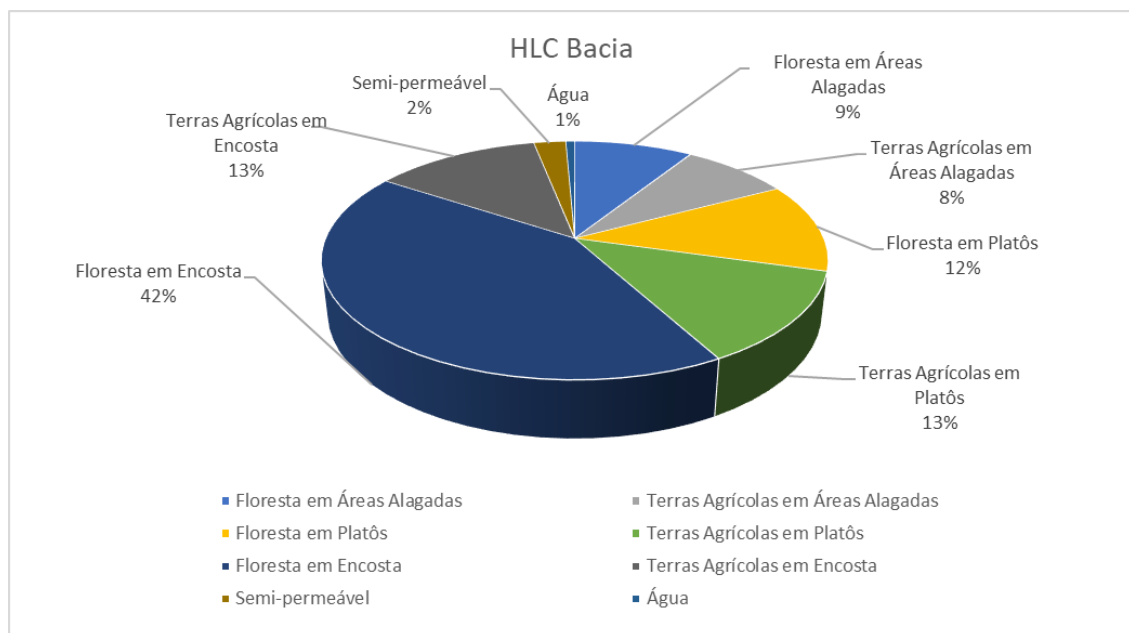


Figura 10 - Gráfico dos usos do solo na bacia do rio Caí.

A Figura 10 apresenta a distribuição das diferentes classes de uso de solo para a bacia do rio Caí. É possível observar que grande parte da bacia é florestada, cerca de 64% de sua área total. Dessas florestas, aproximadamente 42% são em encostas, 12% em platôs (áreas planas) e 9% em áreas alagadas. Em segundo lugar, o maior uso do solo na bacia são as terras agrícolas, que possuem 26% de sua área em platôs, 13% em encosta e 8% em áreas alagadas. A área referente a urbanização é de 2% somente, mostrando ser uma bacia de características rurais.

5 MATERIAIS E MÉTODOS



5.1 Modelo MGB

O Modelo de Grandes Bacias (MGB) (COLLISCHONN et al., 2007) é um modelo de simulação hidrológica e hidrodinâmica, que possui uma interface acoplada ao software de geoprocessamento QGIS. Modelos como o MGB (Figura 11) utilizam equações de base física e conceitual e dividem a bacia hidrográfica em células ou minibacias e trechos de rios, simulando o ciclo hidrológico terrestre e estimando séries temporais de vazões ao longo da rede de rios, além de outras variáveis como níveis d'água, evapotranspiração e áreas inundadas (ALVES et al, 2020).

Trata-se de um modelo hidrológico distribuído, ou semidistribuído, que divide a bacia hidrográfica em muitas unidades espaciais menores, num procedimento denominado discretização. Na versão original do modelo MGB, a discretização da bacia era realizada em células regulares quadradas, com dimensões de 10 x 10 km, tipicamente. Na versão atual do modelo MGB, a discretização é realizada de uma forma não estruturada, considerando pequenas bacias hidrográficas incrementais, denominadas minibacias (COLLISCHONN, 2020a).

Para entender o funcionamento do MGB, é possível considerar três divisões em sua estrutura:

1. Módulo de balanço de água e energia no solo;
2. Módulo de escoamento interno na minibacia;
3. Módulo de escoamento na rede de drenagem.

De acordo com Collischonn et al. (2020a) o primeiro módulo é a parte do modelo MGB em que são realizados os cálculos relativos aos processos hidrológicos verticais, ou seja, em que predomina o fluxo da água da atmosfera para o solo (precipitação – vertical para baixo); o fluxo de água do solo para o aquífero (infiltração – vertical para baixo) e o fluxo de água do solo e da vegetação para a atmosfera (evapotranspiração - vertical para cima).

Já o segundo módulo, a representa os processos hidrológicos horizontais que ocorrem dentro de uma minibacia, desde a origem do escoamento, que se dá no módulo de balanço de água, até atingir a rede de drenagem principal da bacia, que é representada explicitamente no módulo de escoamento na rede de drenagem. O módulo de escoamento interno na minibacia representa separadamente os fluxos de água pelas vias superficial, subsuperficial e subterrânea (COLLISCHONN, 2020a).

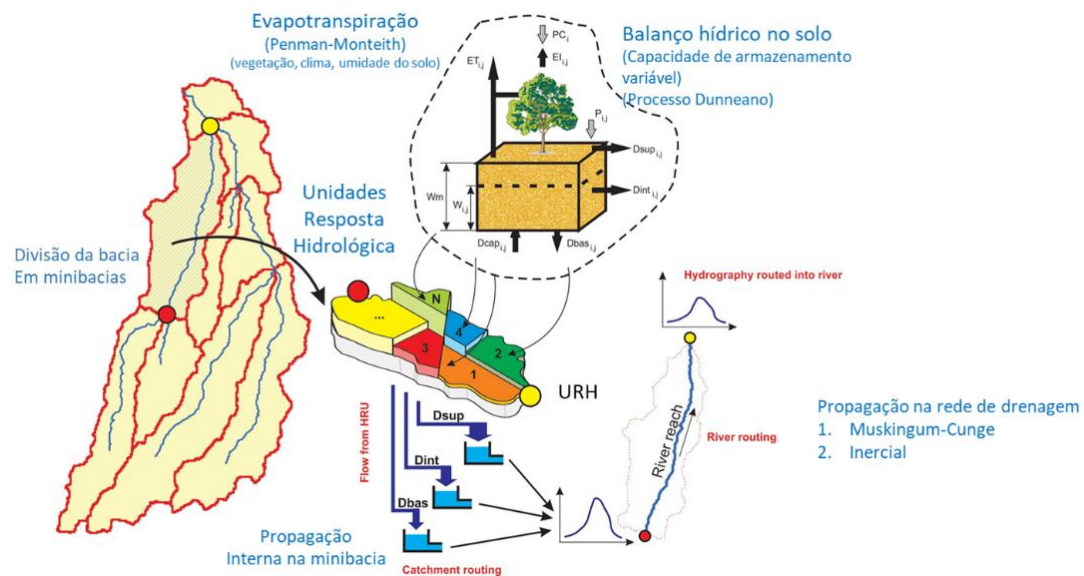


Figura 11 - Esquema do funcionamento do MGB. Fonte: HGE, s.d.

Por fim, o terceiro módulo de escoamento da rede de drenagem representa os processos horizontais que ocorrem ao longo dos principais rios da bacia, simulados através da metodologia de cálculo com método Inercial ou o método Muskingum-Cunge. Segundo Collischonn et al. (2020a), o método Muskingum-Cunge é menos exigente do ponto de vista computacional, e permite realizar simulações com tempo de processamento significativamente mais baixos do que o modelo inercial. Entretanto, o modelo Muskingum-Cunge não é adequado para a simulação de bacias hidrográficas com rios de baixa declividade, ou onde existem planícies de inundação. Rios de baixa declividade podem ser definidos, neste caso, como rios com declividade inferior a 20 centímetros por km.

Já o modelo inercial, por outro lado, não tem limitações relacionadas à declividade dos rios, e pode ser aplicado em bacias com rios de alta ou baixa declividade. Além disso, o método inercial permite representar mais adequadamente rios com planícies de inundação e gerar mancha de inundação com o MGB, por isso este método foi utilizado neste estudo.

No modelo MGB a área da bacia é dividida em unidades menores, denominadas minibacias, que são as áreas de contribuição imediatas a um segmento de rio. As minibacias são delimitadas de acordo com a topografia e ligadas entre si por canais de drenagem. Cada minibacia possui um único trecho de rio, e a troca de água entre uma minibacia e outra ocorre, normalmente, única e exclusivamente por este trecho de rio (COLLISCHONN, 2020a).

Além da divisão espacial em minibacias, o modelo MGB utiliza outros dois conceitos de discretização: as sub-bacias e as Unidades de Resposta Hidrológica (URH). Sendo as sub-bacias agrupamentos regionais de minibacias, com o objetivo de facilitar a regionalização do processo de calibração dos parâmetros do modelo e as URHs são subdivisões internas das minibacias, com base em critérios baseados em mapas de tipos de solos, vegetação e outros (COLLISCHONN, 2020a).

A forma adotada no modelo MGB para representar a variabilidade interna das minibacias é baseada no conceito de Unidades de Resposta Hidrológica, ou Classes de Resposta Hidrológica. As Classes de Resposta Hidrológica (CRH) são regiões em que o comportamento hidrológico esperado é homogêneo,

e elas permitem, ao mesmo tempo, representar a variabilidade das características físicas da bacia e manter um certo grau de simplicidade na definição do valor dos parâmetros do modelo hidrológico (COLLISCHONN, 2020a).

5.2 Dados Pluviométricos e Fluviométricos

As séries de precipitações foram obtidas a partir do plugin do MGB – IPH com a função ANA Data Acquisition, que permite o download automático de várias estações pluviométricas e fluviométricas, utilizando as coordenadas de interesse da área de um polígono com buffer de aproximadamente 20km da área da bacia (Figura 12).

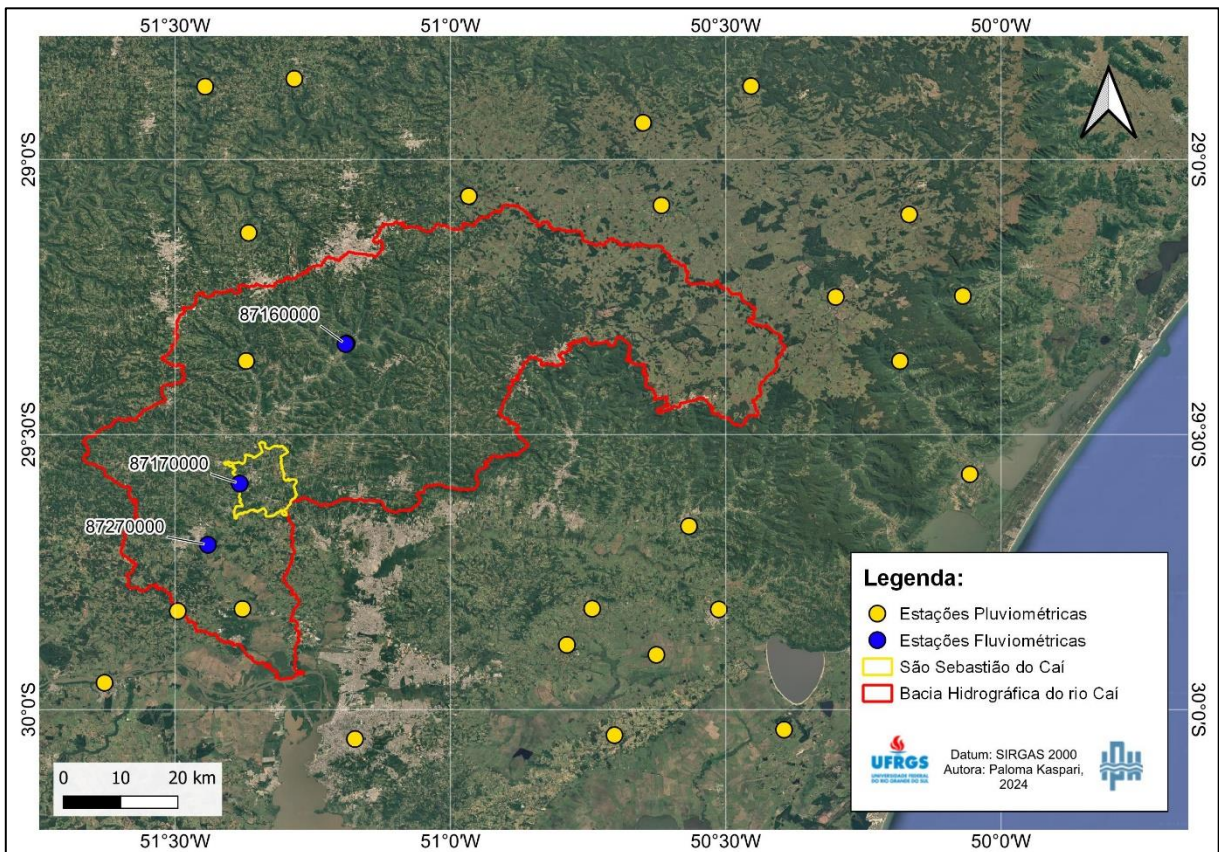


Figura 12 - Estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas no trabalho.

Após definir a latitude e longitude do polígono, foram gerados arquivos do período de 01/01/2005 até 01/06/2024 (Figura 13), com o objetivo posterior de comparar a simulação hidrológica anterior a grande cheia de maio de 2024, utilizando pelo menos 20 anos de dados hidrológicos.

Figura 13 - Dados de entrada no ANA data acquisition do MGB.

Utilizando o software Super Manejo de Dados 2.1 desenvolvido pelo HGE, é possível visualizar a disponibilidade temporal dos dados das estações baixadas pelo ANA data acquisition, conforme Figura 14, para o período do estudo. Como muitas estações pluviométricas podem conter erros ou somente alguns anos de dados, foram desclassificadas as estações que tiveram menos de 10% de disponibilidade de dados. A Tabela 2 apresenta a longitude e latitude dos postos fluviométricos.

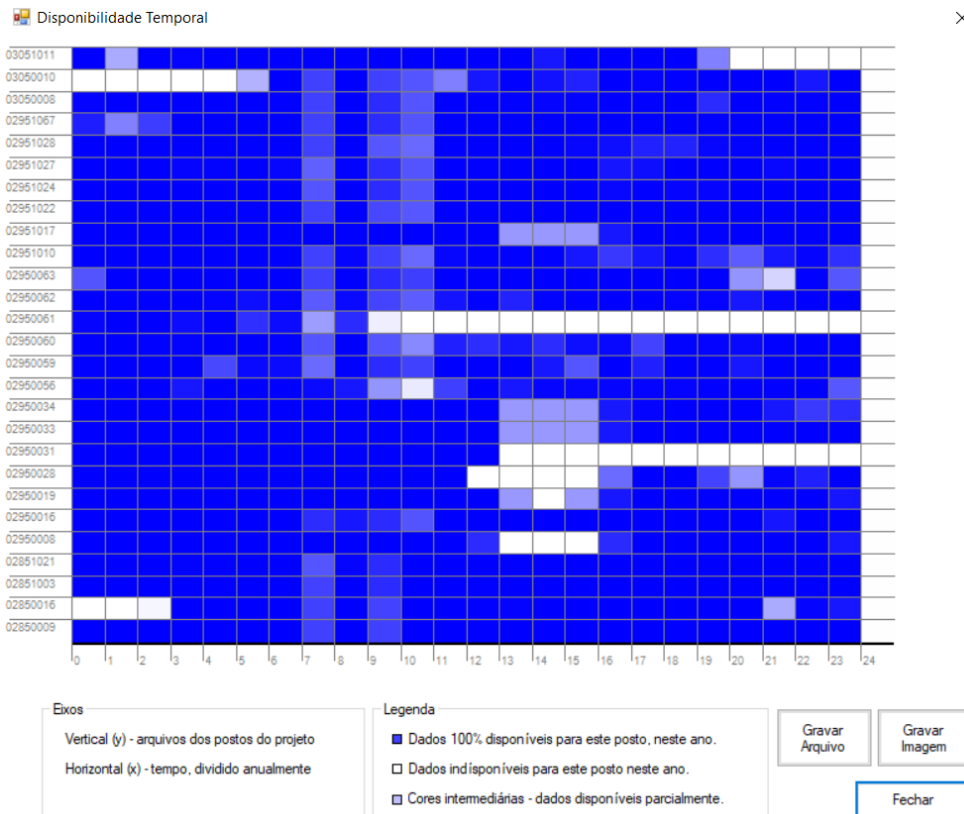


Figura 14 - Disponibilidade temporal das estações pluviométricas no Super Manejo de Dados.

Tabela 2 - Longitude e latitude dos postos pluviométricos utilizados na simulação.

Estação	Longitude	Latitude	Estação	Longitude	Latitude
2850009	-50.45389	-28.86667	2950061	-50.91028	-29.85083
2850016	-50.65	-28.93333	2950062	-50.62583	-29.90055
2851003	-51.28361	-28.85333	2950063	-50.3	-29.25
2851021	-51.44556	-28.8675	2951010	-51.85417	-29.23417
2950008	-50.16667	-29.1	2951017	-51.36666	-29.13333
2950016	-50.78833	-29.8825	2951022	-51.18861	-29.33472
2950019	-50.61666	-29.08333	2951024	-51.37778	-29.81722
2950028	-50.56667	-29.66667	2951027	-51.37111	-29.36639
2950031	-50.51667	-29.81667	2951028	-51.49528	-29.82111
2950033	-50.96667	-29.06667	2951067	-51.62833	-29.95139
2950034	-50.18333	-29.36667	3050008	-50.70195	-30.04667
2950056	-50.06917	-29.24806	3050010	-50.39389	-30.03667
2950059	-50.7425	-29.81667	3051011	-51.17333	-30.05361
2950060	-50.5125	-29.81806			

Após, é necessário realizar a interpolação dos dados para as mini bacias geradas. Para isso, foi utilizado a função Using ANA data (Brazil), onde foi carregados os arquivo gauges de todas as estações pluviométricas e o arquivo MINI.gtp gerado com as informações das mini bacias, conforme Figura 15.

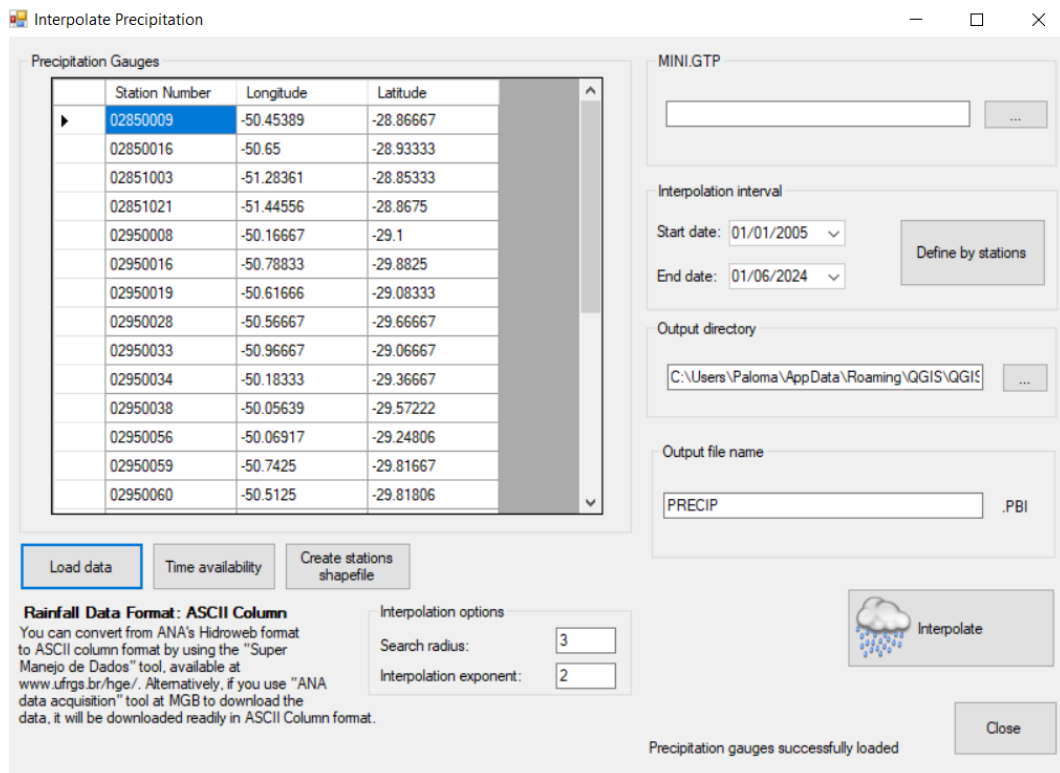


Figura 15 - Interpolação dos dados de chuva.

As séries de vazão também foram obtidas pela função ANA Data Acquisition, alterando o tipo de informação para Discharge (Vazão), utilizando o mesmo período de dados (01/01/200 a 01/01/2024),

porém alterando as coordenadas para longitude e latitudes da bacia. Com isso, foram obtidos três postos fluviométricos com a disponibilidade temporal conforme Figura 16.

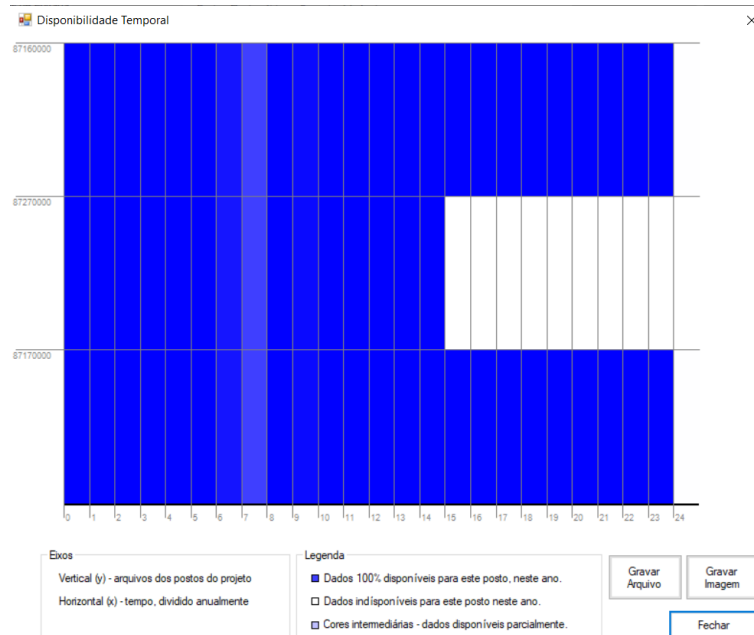


Figura 16 - Disponibilidade temporal dos dados de vazão.

Tabela 3 - Estações fluviométricas selecionadas.

Estação	Nome	Área de Drenagem (km)	Rio
87160000	Nova Palmira	2030	rio Caí
87170000	Barca do Caí	3030	rio Caí
87270000	Passo Montenegro	4360	rio Caí

A partir do arquivo “mini_mgb” gerado no item 5.1, foi necessário identificar o número da mini bacia correspondente ao local do posto fluviométrico (coluna ID_Mini na tabela de atributos do arquivo). Com os valores identificados, foi possível fazer o *download* das vazões observadas desses postos fluviométricos, conforme Figura 17.

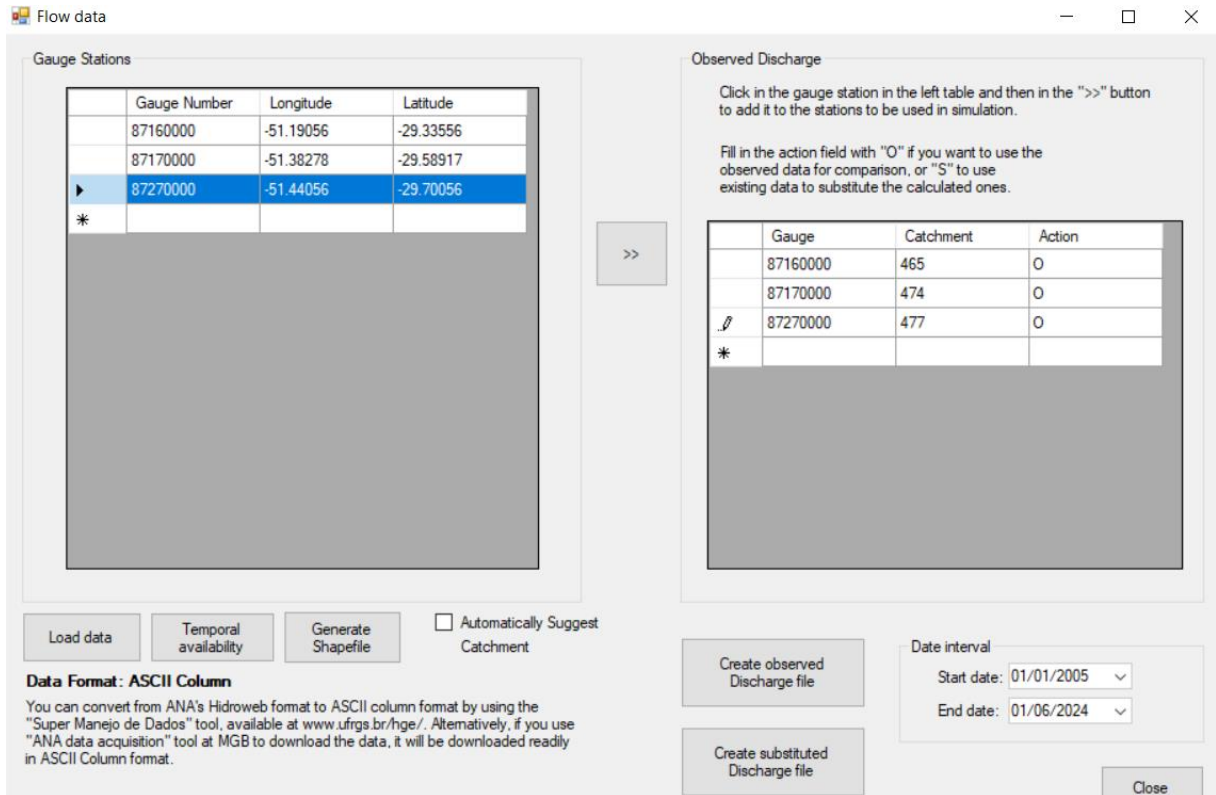


Figura 17 - Ferramenta das vazões observadas com a correlação das minibacias com estações.

5.3 Pré-processamento com IPH Hydro Tools

O IPH-Hydro Tools (IPHHT) é um pacote de ferramentas que funciona como um plugin do software livre de SIG MapWindow GIS e Quantum GIS. Permite ao usuário extrair atributos como rede de drenagem, bacias e minibacias hidrográficas a partir de modelos digitais de elevação. Trabalha com arquivos raster no formato ASCII com tamanho de até aproximadamente 250.000.000 de células. Assim, permite trabalhar com grandes bacias, além de gerar redes de drenagem mais orgânicas devido aos métodos de remoção de depressões disponíveis – HS (Heuristic Search), PFS (Priority First Search) e MHS (Modified Heuristic Search) (HGE, s.d).

Entre os principais produtos que podem ser gerados com o uso do IPHHT estão: as direções de fluxo com base na inclinação do terreno, a rede de drenagem derivada de uma área mínima limiar, a delimitação de bacias hidrográficas até o ponto de interesse a subdivisão da bacia hidrográfica em pequenas sub-bacias (mini bacias), que são caracterizadas pela área entre duas confluências ou entre uma confluência e uma nascente (SIQUEIRA et al, 2016).

Como o exutório da bacia está localizado numa região de baixa altitude, próximo ao lago Guaíba, ao realizar o recorte do MDE para a área da bacia, gerava alguns pixels sem dados bem próximo ao seu exutório, o que poderia confundir o programa ao gerar a rede de drenagem. Desta maneira, foi optado delimitar a bacia um pouco acima do seu exutório, afim de gerar os melhores dados possíveis, o que não afetaria no resultado, pois o objetivo de estudo é avaliar a mancha de inundação na cidade de São Sebastião do Caí. A Figura 18 apresenta a bacia hidrográfica gerada, assim como as mini bacias com comprimento de rio de aproximadamente 7km e a rede de drenagem gerada.

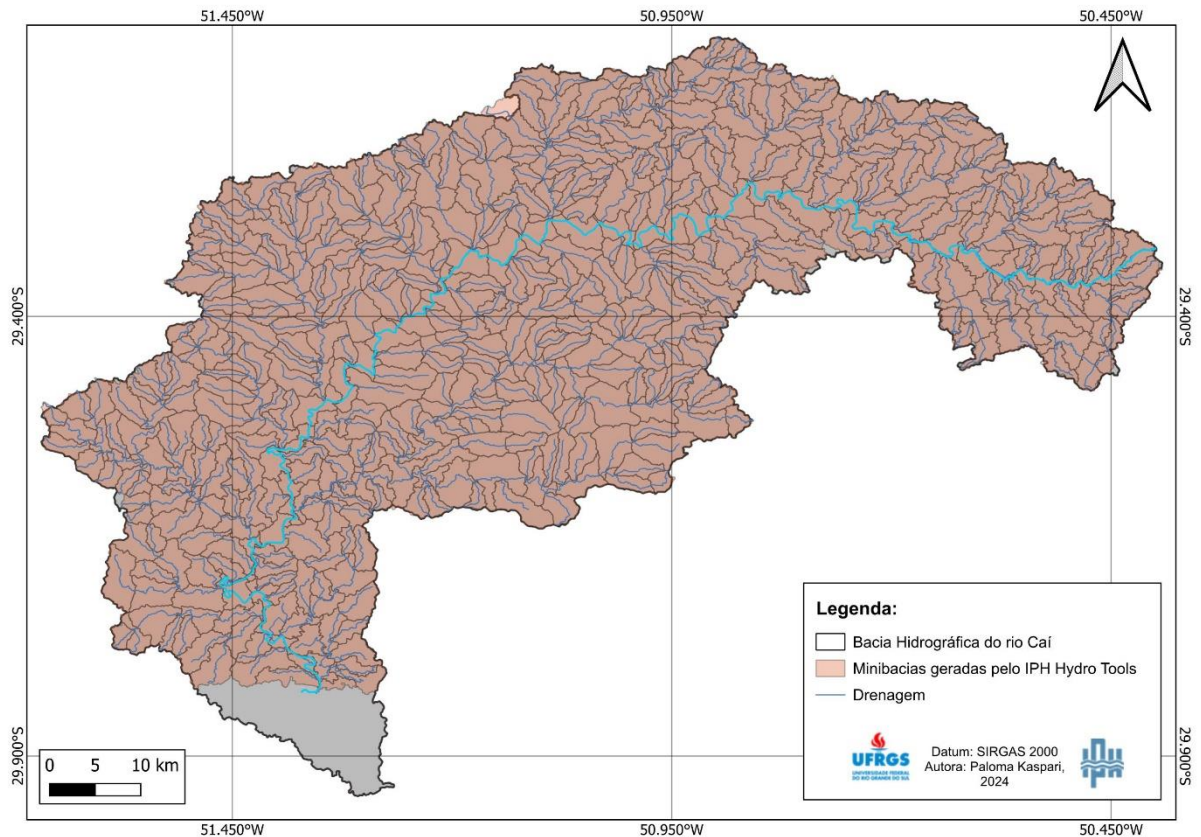


Figura 18 - Minibacias e drenagem gerada pelo IPH Hydro Tools.

Após isso, foi realizado o pré processamento para utilização do modelo MGB. Esta função necessita a entrada dos arquivos gerados nos passos anteriores do IPHHT, como:

1. Modelo Digital de Elevação (MDE);
2. Direções de escoamento;
3. Minibacias (bacias por trechos de rio);
4. Rede de drenagem segmentada na bacia;
5. Classes de resposta hidrológica (HRCs) e
6. Sub-bacias.

Os detalhes do passo a passo do IPHHT e da geração de todos os arquivos supracitados podem ser vistos no Manual de Exemplo de Aplicação do Modelo MGB 2018 Utilizando o IPH-Hydro Tools (MEDEIROS et al, 2019).

O modelo MGB utiliza as relações geomorfológicas com base em dados de largura, profundidade e área de drenagem da bacia a montante de cada minibacia gerada pelo pré-processamento do MGB. Para a bacia do rio Caí, as relações geomorfológicas para a largura e profundidade utilizadas no modelo estão apresentadas na equação (1) e equação (2), respectivamente.

$$L_i = 0,58 \times A_i^{0,525} \quad (1)$$

$$P_i = 0,3 \times A_i^{0,25} \quad (2)$$

Sendo L a profundidade da calha do rio (m) na minibacia i, L a largura da calha do rio(m) na minibacia i e A a área de drenagem (m²) na minibacia i.

A partir dos dados das estações fluviométricas obtidos através do HidroWeb para cada estação, foi calculada a média das vazões mensais de todo período analisado, 2005 a 2024, dos três postos fluviométricos. Com isso, foi possível analisar a profundidade do rio, através do arquivo de Resumos de Descarga, das últimas medições para encontrar a vazão mais próxima da vazão média e a profundidade registrada nesse dia.

Tabela 4 - Vazões médias e profundidade associada aos postos fluviométricos.

Estação	Vazão média (m ³ .s ⁻¹)	Profundidade aproximada (m)
87160000	41,17	1,53 – 1,7
87170000	64,42	2,3 – 2,7
87270000	89,64	2,8 – 3,2

5.3.1 Dados de clima

Para calcular a evapotranspiração no modelo MGB são utilizados dados de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e insolação (horas de sol por dia). Utilizando a função Using INMET Climatology Database (Brazil), que disponibiliza todas as estações climatológicas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), foi gerado um shapefile dessas estações e selecionado somente estações próximas a bacia, conforme Figura 19.

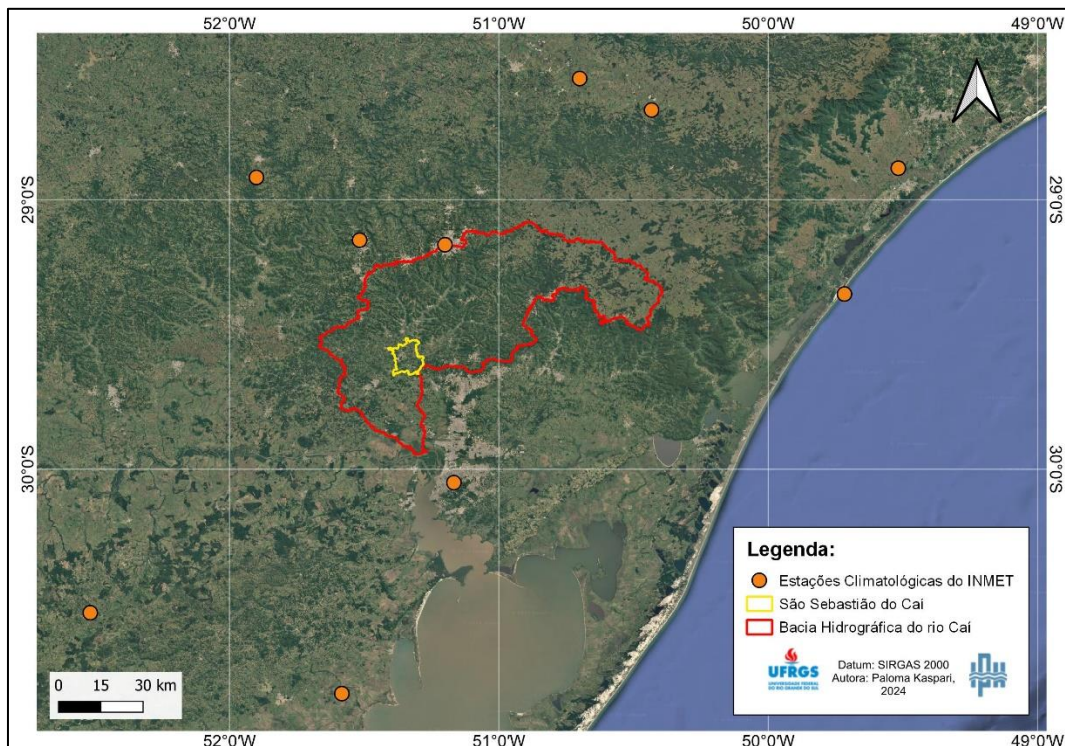


Figura 19 - Estações climatológicas selecionadas do INMET.

5.3.2 Dados de vegetação

Para gerar os dados de vegetação da bacia, foi utilizado o arquivo HRC (Hydrologic Response Classes), utilizando as mesmas onze classes definidas no HLC do BHO2MGB ToolKit descrito no item

4.2, conforme Figura 20.

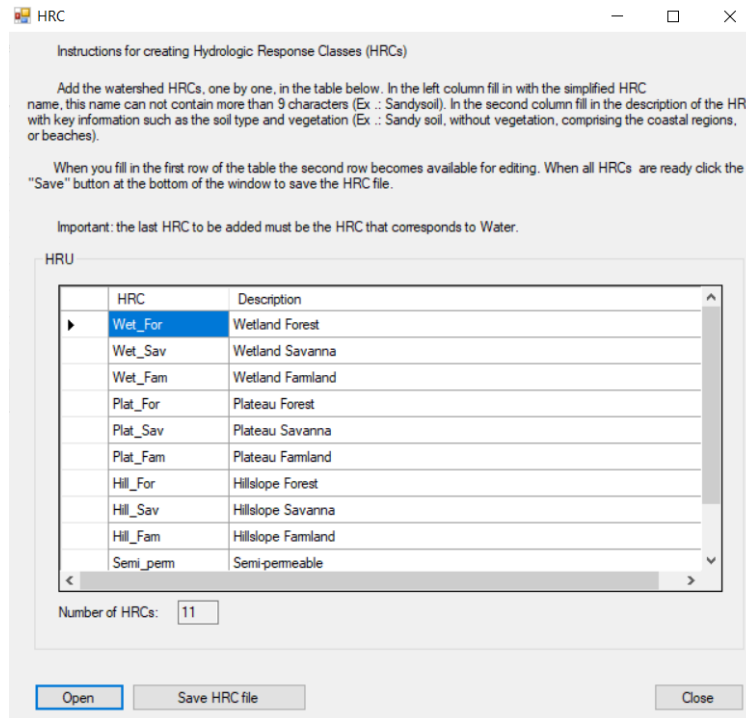


Figura 20 - Classes de resposta hidrológica.

A partir dessas classes, foram definidos parâmetros de vegetação conforme valores utilizados no Manual de Aplicação do BHO2MGB, que fez sua simulação para o rio Carinhana. Foram definidos valores para Albedo, Índice de Área Foliar (*Leaf Area Index*), Altura Média da Vegetação (*Average Vegetation Height*) e Resistência da Superfície (*Surface Resistance*), conforme Tabela 5 e Figura 21. Por simplificação, é assumido os mesmos valores para todos os meses do ano.

Tabela 5 - Parâmetros de vegetação adotados para cada HRC da bacia. Fonte: adaptado do Manual de Aplicação do BHO2MGB.

HRC	Albedo	Índice de Área Foliar	Altura média da Vegetação	Resistência da Superfície
Wet_For	0.14	6	20	100
Wet_Sav	0.16	3	8	80
Wet_Far	0.2	2	1.2	70
Hil_For	0.14	6	20	100
Hil_Sav	0.16	3	8	80
Hil_Far	0.2	2	1.2	70
Pla_For	0.14	6	20	100
Pla_Sav	0.16	3	8	80
Pla_Far	0.2	2	1.2	70
Sem_Per	0.15	1	0.5	70
Wat	0.08	1	0.1	0

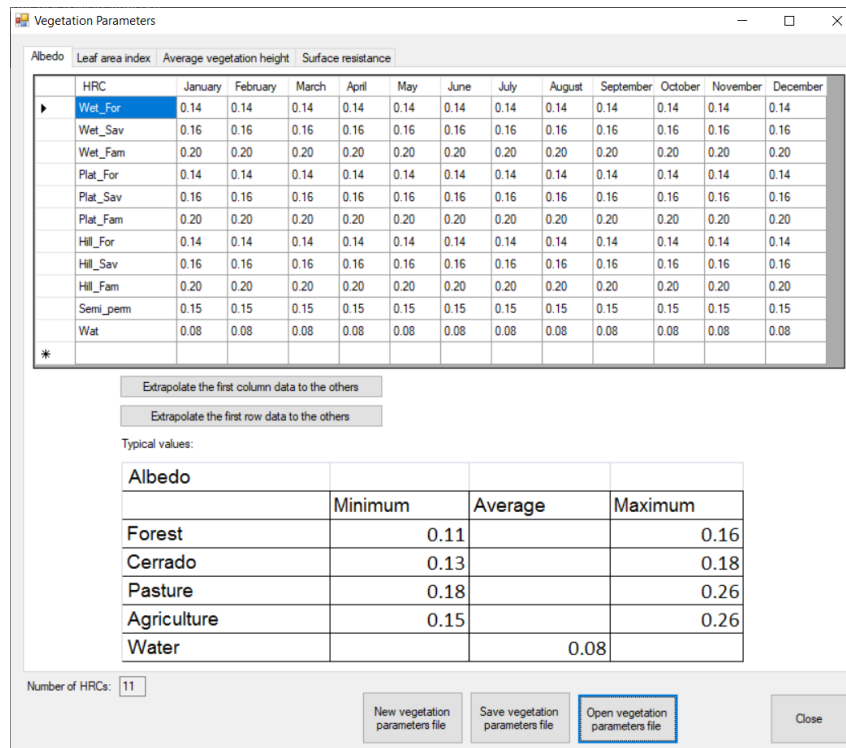


Figura 21 - Parâmetros de vegetação referente ao Albedo.

5.4 Modelo MGB: simulação e calibração

5.4.1 Calibração

A calibração é realizada a cada aplicação do modelo MGB, a fim de obter um bom ajuste entre os dados observados e os dados calculados (COLLISCHON, 2001). Para isso, são definidos valores para todos os parâmetros do solo:

- W_m (mm): capacidade de armazenamento de água no solo;
- b : relação de armazenamento e saturação;
- K_{bas} (mm/dia): parâmetro de escoamento subterrâneo;
- K_{int} (mm/dia): parâmetro de drenagem sub-superficial;
- XL : índice de distribuição do tamanho dos poros;
- CAP : parâmetro de fluxo ascendente de umidade do lençol freático;
- WC (mm): limite de armazenamento para fluxo ascendente ou descendente;
- CS : parâmetro de retardo do reservatório superficial;
- CI : parâmetro de dispersão subsuperficial nas células;
- CB : parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo e
- QB ($m^3 \cdot (s \cdot km^2)^{-1}$): volume no reservatório linear subterrâneo.

Os valores desses parâmetros foram definidos através do método de tentativas, considerando a análise visual dos hidrogramas (simulado e observado), além dos parâmetros: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe das vazões calculadas e observadas (E_{NS}); coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões calculadas e observadas (E_{NS-Log}); e $BIAS$ absoluto, também denominado

erro relativo de volume total dos hidrogramas (ΔV), em porcentagem (GIORDANI, 2021).

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970), apresentado na equação (9), pode variar de negativo infinito até 1, apresentando um valor máximo igual a 1 quando se obtém um ajuste perfeito entre as vazões calculadas e observadas e valores negativos quanto mais distantes uma da outra. Este coeficiente é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas, razão pela qual, quando E_{NS} é próximo de 1, o modelo está obtendo bom ajuste para as cheias. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de E_{NS} supera 0,75 e aceitável se o valor de E_{NS} fica entre 0,36 e 0,75 (GIORDANI, 2021; COLLISCHONN, 2001).

Já o coeficiente de Nash dos logaritmos das vazões, apresentado na equação (3), que também tem seu valor máximo igual à 1, apresenta, também, certa influência pelos erros nas vazões máximas, no entanto é mais fortemente influenciado por baixos fluxos. De acordo com Collischonn (2001), valores de E_{NS-Log} próximos de 1 indicam que o modelo está simulando adequadamente os períodos de recessão do hidrograma e estiagens (GIORDANI, 2021).

O erro no volume, calculado através da equação (5), não tem valor máximo nem mínimo e, diferente dos parâmetros anteriores, não é influenciado de forma diferenciada por períodos de cheias ou estiagens. Ele representa a tendência média dos dados simulados em relação aos dados observados, sendo que valores negativos e positivos de ΔV , indicam, respectivamente, que o modelo subestima ou superestima o fluxo simulado em relação aos dados observados (GIORDANI, 2021). Segundo Collischonn (2001), é um parâmetro útil para observar se as perdas de água por evapotranspiração estão sendo corretamente calculadas pelo modelo.

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (3)$$

$$E_{NS-LOG} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log Q_{obs} - \log Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (\log Q_{obs} - \overline{\log Q_{sim}})^2} \quad (4)$$

$$\Delta V = 100 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim} - Q_{obs})_i}{\sum_{i=1}^N Q_{obs}} \quad (5)$$

Sendo Q_{obs} a vazão observada ($m^3.s^{-1}$), Q_{sim} a vazão simulada ($m^3.s^{-1}$), N o número de intervalos de tempo da série de dados avaliada e $\overline{Q_{obs}}$ a vazão média observada no período de simulação ($m^3.s^{-1}$).

A fim de reproduzir a mancha de inundação do evento de maio de 2024 na bacia, os parâmetros de solo e as relações geomorfológicas foram calibrados através de tentativas observando os resultados de nível da mancha de inundação gerada através do IPH-Hydro Tools. Dessa maneira, a cada simulação com o método Inercial, os principais parâmetros utilizados para visualizar a eficiência da calibração foram: comparação visual do hidrograma observado x simulado, avaliação do coeficiente Nash e Nash-log para cada estação, análise visual do raster de inundação gerado para conferir o nível

d'água na estação Barca do Caí, com objetivo de atingir 17 metros, próximo ao real medido de 17,6m; análise visual da largura e profundidade gerada para cada minibacia através das equações (1) e (2), respectivamente. Para realizar a simulação, foi utilizado o método Inercial, citado no item 5.1.

A partir da calibração realizada, os valores de uso do solo que mais se adequaram para obter os resultados desejados estão listados na Tabela 6.

Tabela 6 - Calibração do uso do solo.

HRC	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Wet_For	200	0,3	0,4	9	0,67	0	0,1
Wet_Sav	200	0,3	0,4	9	0,67	0	0,1
Wet_Far	200	0,3	0,4	9	0,67	0	0,1
Hil_For	200	0,3	0,4	9	0,67	0	0,1
Hil_Sav	200	0,3	0,4	9	0,67	0	0,1
Hil_Far	200	0,3	0,4	9	0,67	0	0,1
Pla_For	200	0,3	0,4	9	0,67	0	0,1
Pla_Sav	200	0,3	0,4	9	0,67	0	0,1
Pla_Far	200	0,3	0,4	9	0,67	0	0,1
Sem_Per	200	0,3	0,4	9	0,67	0	0,1
Wat	0	0	0	0	0	0	0

5.4.2 Cenário de Dragagem

Um dos cenários para avaliar uma solução das cheias na cidade de São Sebastião do Caí seria a dragagem. A dragagem entra como uma opção assim como os diques, só que ao invés de proteger com muros a cidade acima do nível do solo, essa opção retira parte do leito do rio, aprofundando-o. Como as minibacias foram geradas com aproximadamente 7 quilômetros de trecho de rio, para fazer o aprofundamento a montante da cidade de São Sebastião do Caí, foi preciso alterar a profundidade de quatro minibacias a montante da cidade de São Sebastião do Caí (Figura 22).

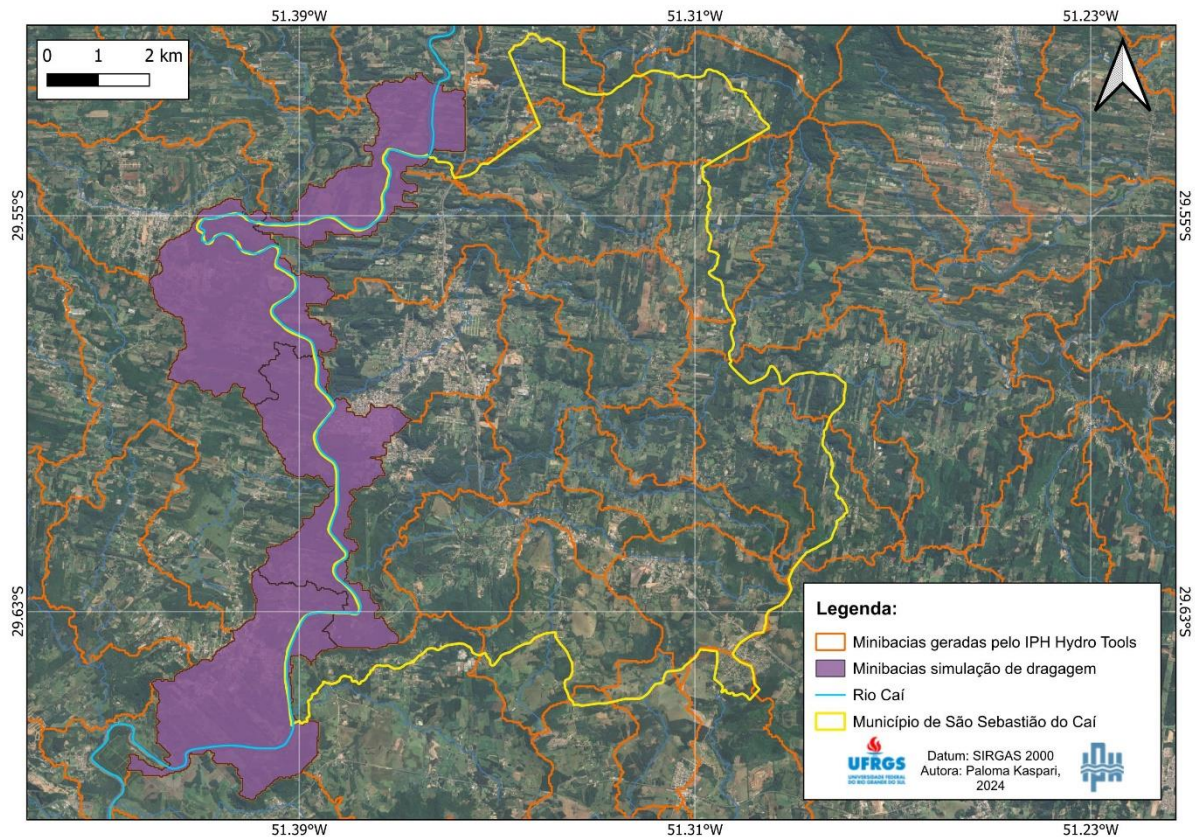


Figura 22 - Minibacias selecionadas para o simulação do cenário de dragagem.

De acordo com o estudo realizado pela Metroplan (2013), o rebaixamento do rio para 5,5 m no trecho de São Sebastião do Caí até Montenegro não teve resultados satisfatório para cheia de 13,3 metros, pois o simulado resultou em uma folga de 0,3 metros. Então optou-se neste estudo simular o rebaixamento em 7,17 metros para as quatro minibacias da Figura 22, considerando 5,8m para cheia de 13,3m, acréscimo de 1m considerando a cheia de maio de 2024 que atingiu 17 metros no posto fluviométrico barca do Caí e 1,2 m de segurança. No estudo da Metroplan (2013), foi aprofundado cerca de 27km de rio, o que foi seguido neste estudo também. Além disso, as minibacias a jusante foram gradativamente dragadas, com 6m, 5m, 4m, 3m até chegar na profundidade observada de 2m na região do exutório da bacia, a fim de evitar um recalque de 5 metros de diferença entre as minibacias dragadas e as minibacias a jusante, que poderia acarretar num acúmulo de água na região dragada.

5.4.3 Cenário de Reflorestamento completo da bacia

De modo a avaliar o impacto da mudança de uso do solo em relação as vazões máximas e mancha de inundação na cidade de São Sebastião do Caí, através do florestamento de praticamente a bacia do rio Caí inteira, foi realizado uma simulação com este cenário. Os parâmetros de vegetação da bacia utilizados para fazer a simulação com o MGB foram alterados de modo a representar somente floresta, área impermeável (as cidades) e área com água. Dessa forma, os valores de Albedo, Índice de Área Foliar, Altura média da Vegetação e Resistência da Superfície para cada HRC foram alterados para valores representativos de floresta, como é possível visualizar na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores de vegetação para cenário de florestamento da bacia do rio Caí.

HRC	Albedo	Índice de Área Foliar	Altura média da Vegetação	Resistência da Superfície
Wet_For	0.14	6	20	100
Wet_Sav	0.14	6	20	100
Wet_Far	0.14	6	20	100
Hil_For	0.14	6	20	100
Hil_Sav	0.14	6	20	100
Hil_Far	0.14	6	20	100
Pla_For	0.14	6	20	100
Pla_Sav	0.14	6	20	100
Pla_Far	0.14	6	20	100
Sem_Per	0.15	1	0.5	70
Wat	0.08	1	0.1	0

Além disso, o parâmetro W_m do solo também foi alterado para simular uma bacia toda vegetada. De acordo com Collischonn (2001), esse parâmetro depende do tipo do solo e do tipo de vegetação, porque ele reflete a capacidade de armazenamento do solo, que depende da profundidade em que as raízes das plantas podem recuperar a água filtrada. Deste modo, o parâmetro foi alterado para 240, aumentando 20% do valor calibrado na simulação deste estudo, valor aproximado apresentado por Collischonn para diferentes tipos de solo e que representa uma maior capacidade de armazenamento no solo, assim como solos com raízes de floresta.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Mancha de inundação de 2024

A partir da simulação realizada com MGB, obteve-se a mancha de inundação para o evento extremo de maio de 2024, conforme Figura 23. Essa mancha foi sobreposta com a mancha de inundação simulada do evento que foi produzida por Leonardo Leipelt (Possantti et al, 2024) a partir de simulação hidrodinâmica com HEC-RAS para ajustar o nível em 550cm no Cais Maua – Porto Alegre.

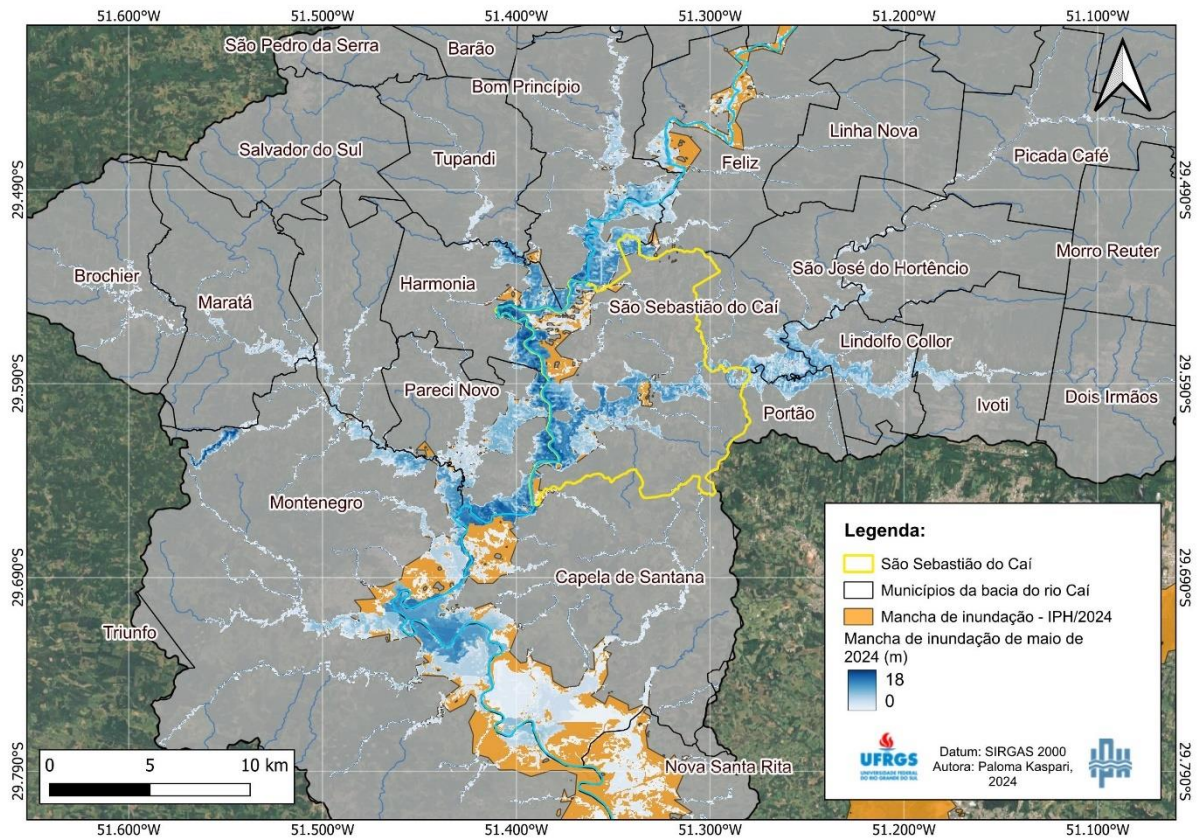


Figura 23 - Mancha de inundação na bacia do rio Caí.

Na cidade de São Sebastião do Caí, é possível observar pelas diferenças das manchas (Figura 24), que uma parte da cidade não foi abrangida pela mancha simulada neste estudo, devido as incertezas envolvendo o MDE utilizado e o fato dele não representar muito bem essa planície. Além disso, a mancha gerada pelo grupo de pesquisas do IPH utilizou batimetrias para melhorar o resultado, que pode ser uma das hipóteses da diferenças entre as manchas. No mais, a mancha gerada pela simulação atingiu os 17m registrado no evento de maio em São Sebastião do Caí, obtendo assim o resultado esperado.

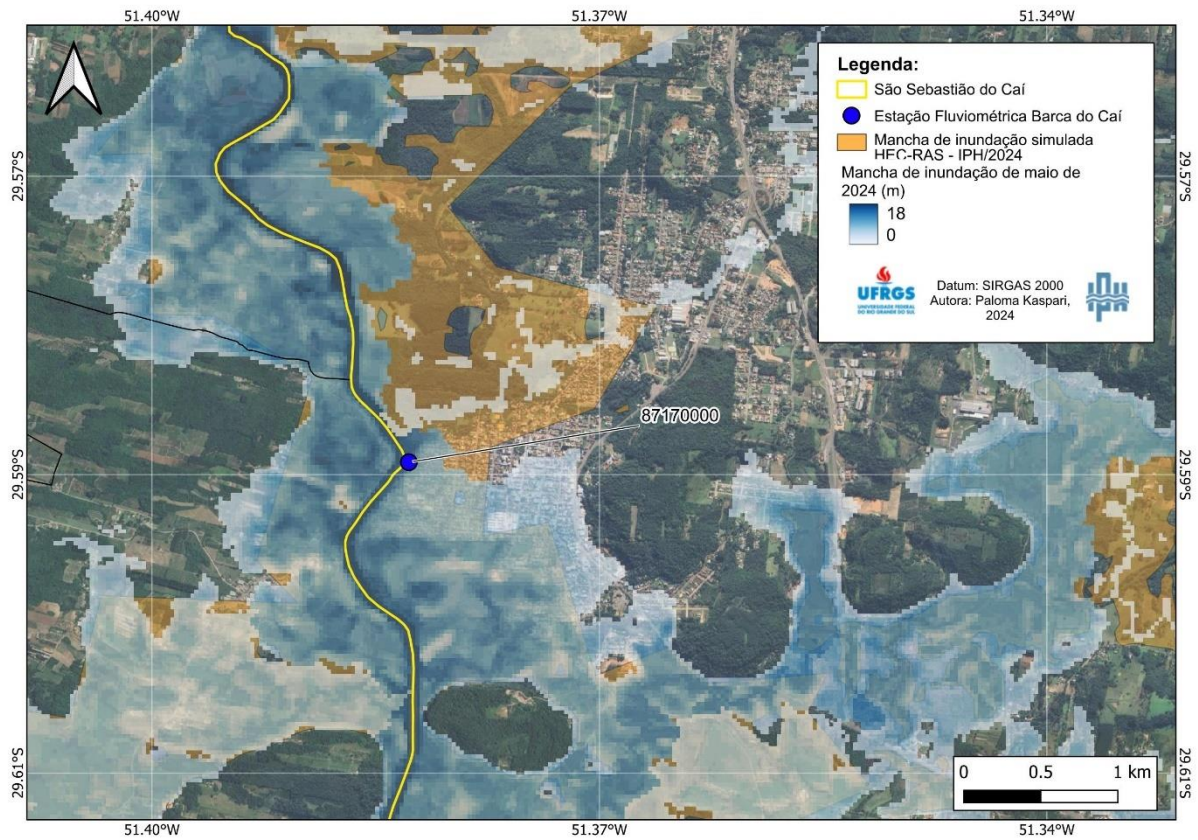


Figura 24 - Mancha de Inundação do evento de maio de 2024 na cidade de São Sebastião do Cai.

Para a validação desse resultado, foi comparado os hidrogramas observados e simulados dos postos fluviométricos disponíveis e os resultados dos coeficientes Nash, Nash-log e Bias. No posto fluviométrico 87170000 – Barca do Caí, situado na cidade de São Sebastião do Caí obteve-se Nash e Nash-log de 0,68 e 0,73, respectivamente, sendo considerado aceitável (COLLISCHONN, 2001). O BIAS ficou em 39%.

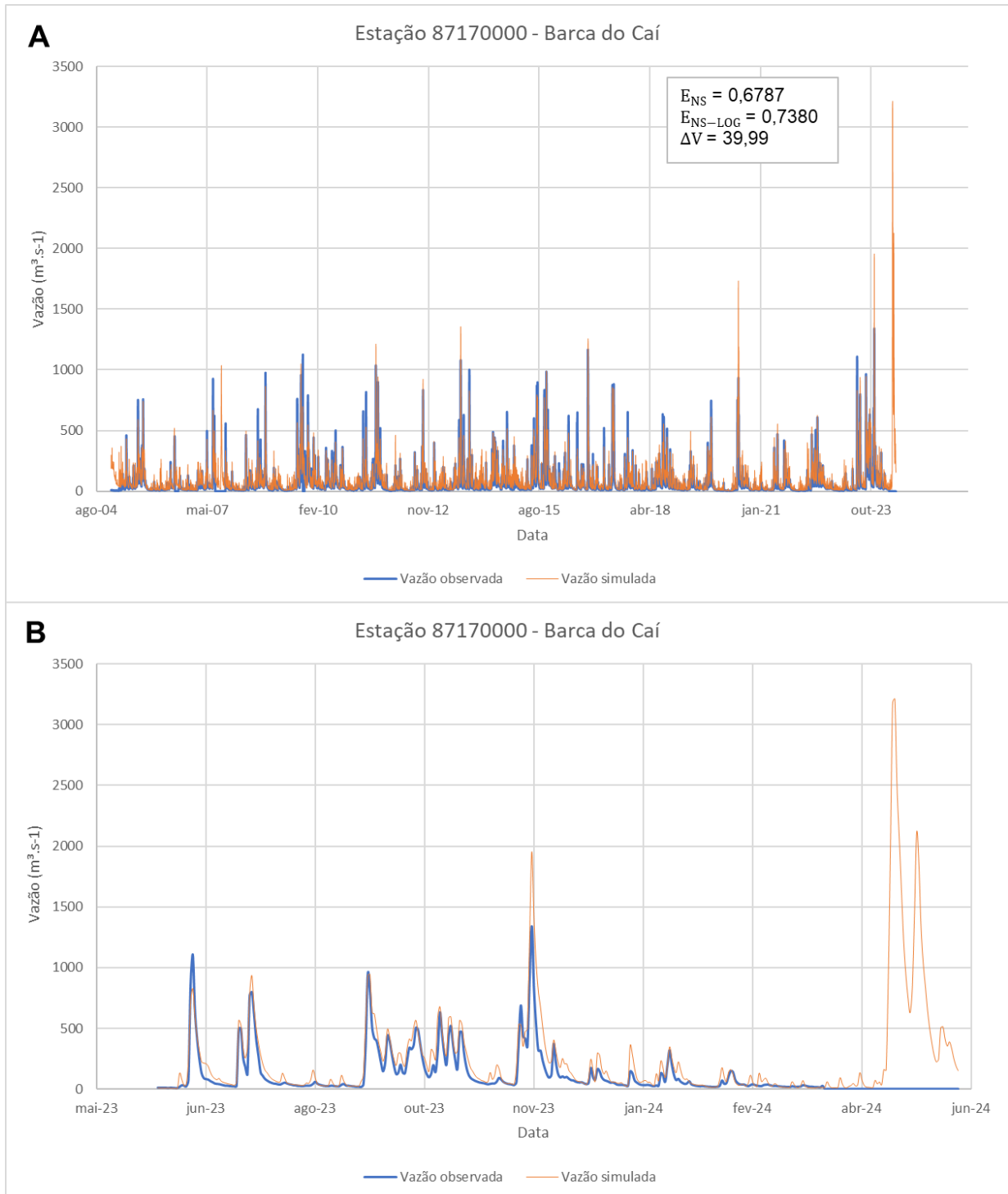


Figura 25 - Hidrograma observado x simulado para Estação 87170000 - Barca do Caí. (A) todo período simulado, (B) período de junho de 2023 a junho de 2024.

No posto fluviométrico 87160000 – Nova Palmira (Figura 26), situado mais a montante da bacia, obteve-se Nash e Nash-log de 0,67 e 0,71, respectivamente, sendo considerado assim aceitável (COLLISCHONN, 2001). O BIAS ficou em 13,5%.

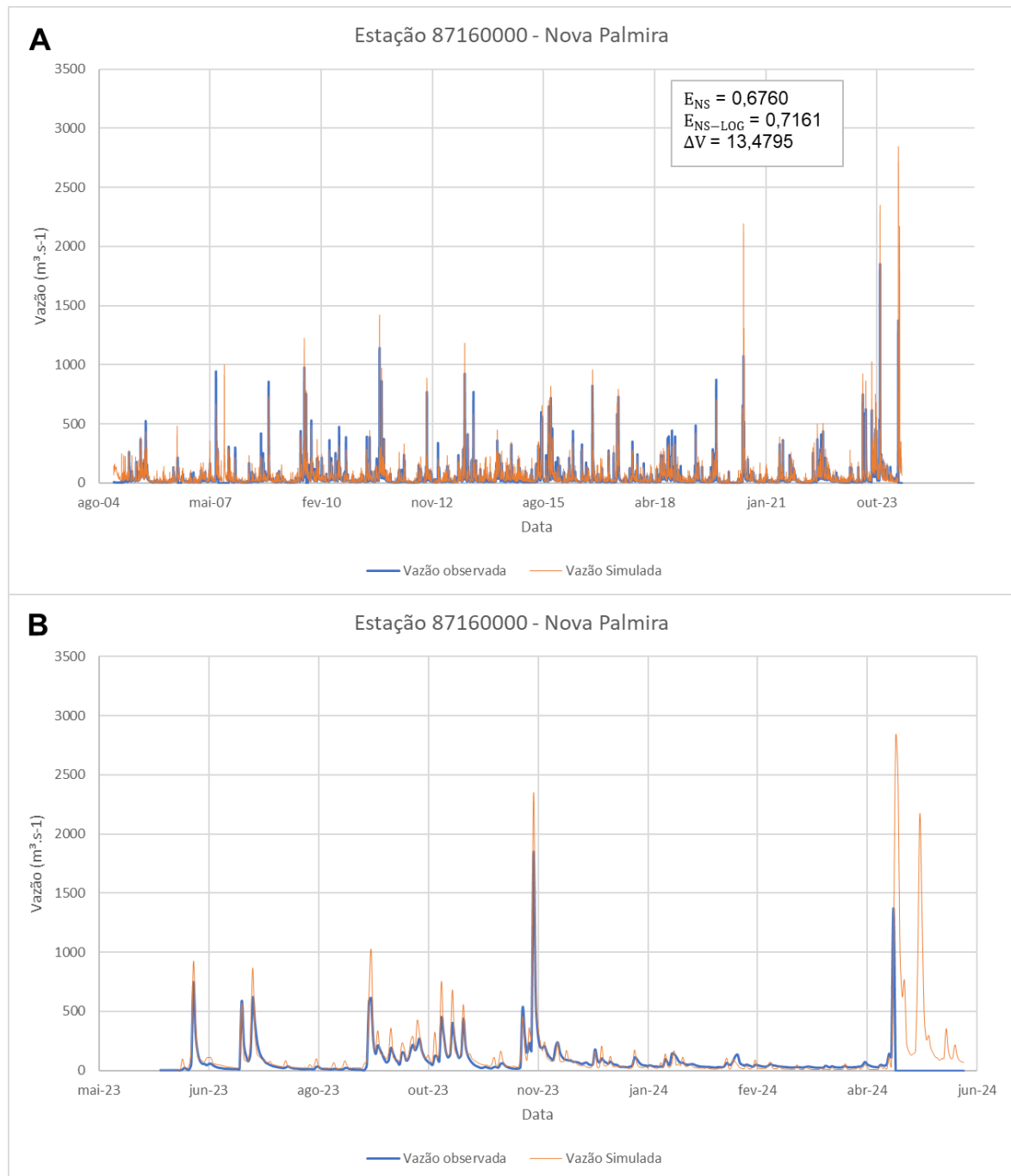


Figura 26 - Hidrograma observado x simulado para Estação 87160000 – Nova Palmira. (A) todo período simulado, (B) período de junho de 2023 a junho de 2024.

O posto fluviométrico 87270000 – Passo Montenegro (Figura 27), localizado em Montenegro, a jusante de São Sebastião do Caí, obteve Nash e Nash-log de 0,68 e 0,31, respectivamente. O BIAS ficou em torno de 6%. Sendo assim, o valor de Nash foi considerado como aceitável, porém o Nash-log ficou 0,4 unidades abaixo do aceitável. Como esse coeficiente é mais fortemente influenciado pelas vazões mínimas, representando períodos de recessão do hidrograma e estiagem, o que não é o foco deste estudo, foi considerado aceitável.

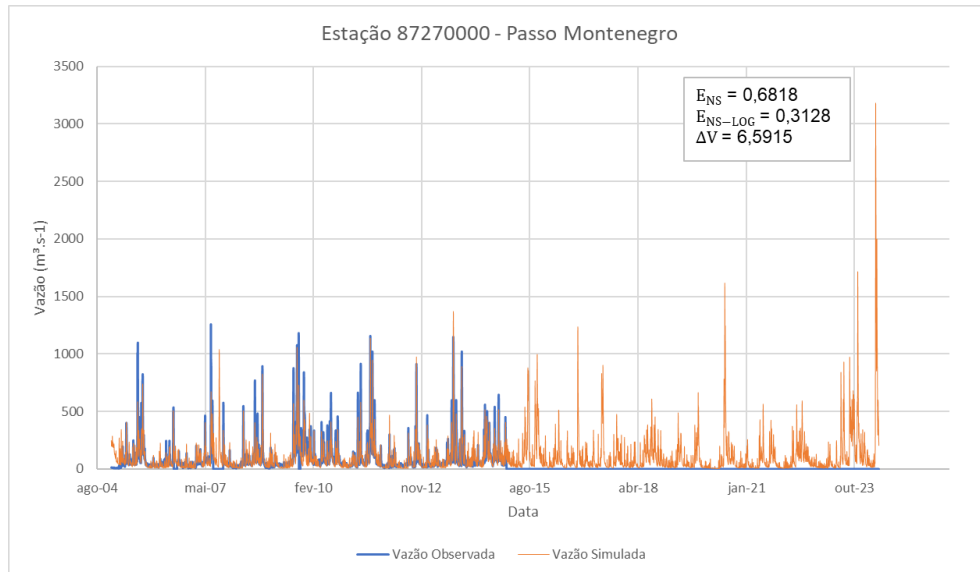


Figura 27 - Hidrograma observado x simulado para Estação 87270000 - Passo Montenegro.

Como o posto fluviométrico 87270000 não teve registros para o período de interesse do estudo, foi gerado somente o hidrograma observado x simulado de todo o período de estudo.

6.2 Cenário de Dragagem

Para o cenário de dragagem do trecho a montante e a jusante da cidade de São Sebastião do Caí, obteve-se uma mancha de inundação para o evento de maio de 2024 com diferença de 2 metros de cota em relação a mancha simulada na estação do Barca do Caí. Foi possível observar também que a inundação atingiria a cidade assim como o evento extremo de maio de 2024 atingiu, vide Figura 28.

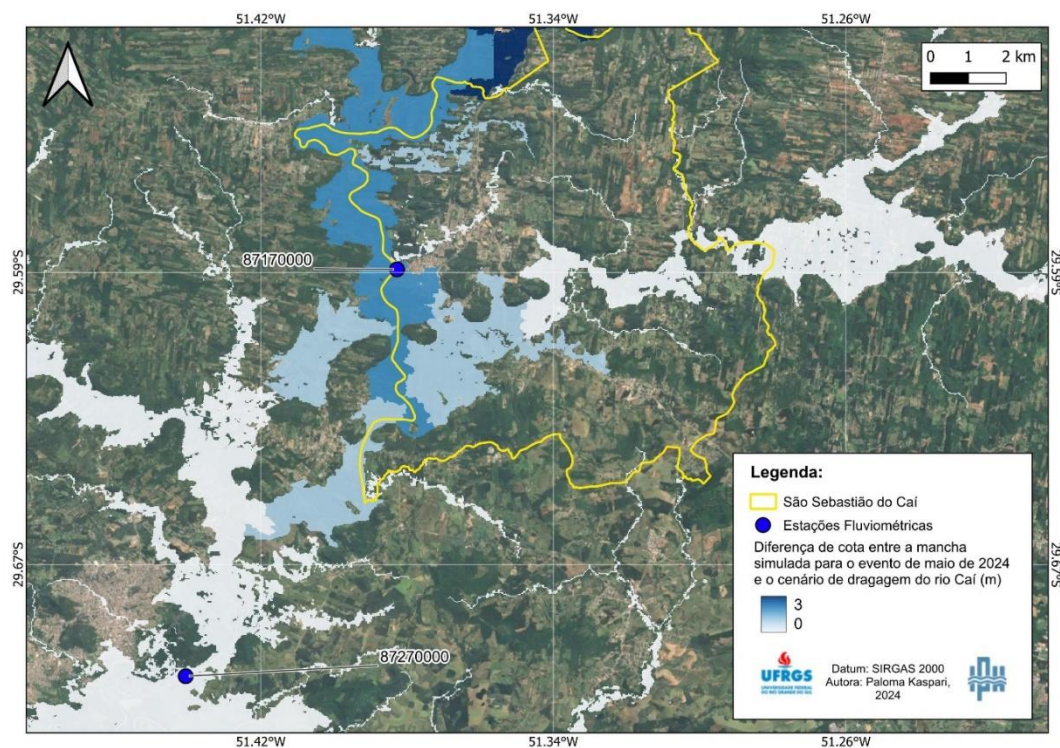


Figura 28 - Diferença entre a mancha simulada para o evento de maio de 2024 e o cenário de dragagem.

É possível observar que a maior diferença de cotas observadas está a montante da cidade de São Sebastião do Caí, com 3 metros. Já na cidade, houve uma diferença entre a mancha simulada com o cenário de dragagem de 2 metros. Além disso, não foi observado alteração entre o hidrograma simulado e o hidrograma gerada a partir deste cenário em nenhuma das estações fluviométricas utilizadas. Isso demonstra que esta alternativa diminuiria o impacto causado por uma cheia extrema, principalmente em relação a altura que a água atingiria a cidade, porém os mesmos lugares seriam atingidos, não sendo considerado uma alternativa eficaz, além de envolver altos custos de projeto e manutenção.

6.3 Cenário de Reflorestamento completo da bacia

Para o cenário de mudança do uso do solo, transformando praticamente a bacia inteira em floresta, observou-se que a inundação atingiria a cidade de São Sebastião do Caí na mesma proporção que o evento extremo de maio de 2024, porém com diferença de cota de 1 metro (Figura 29).

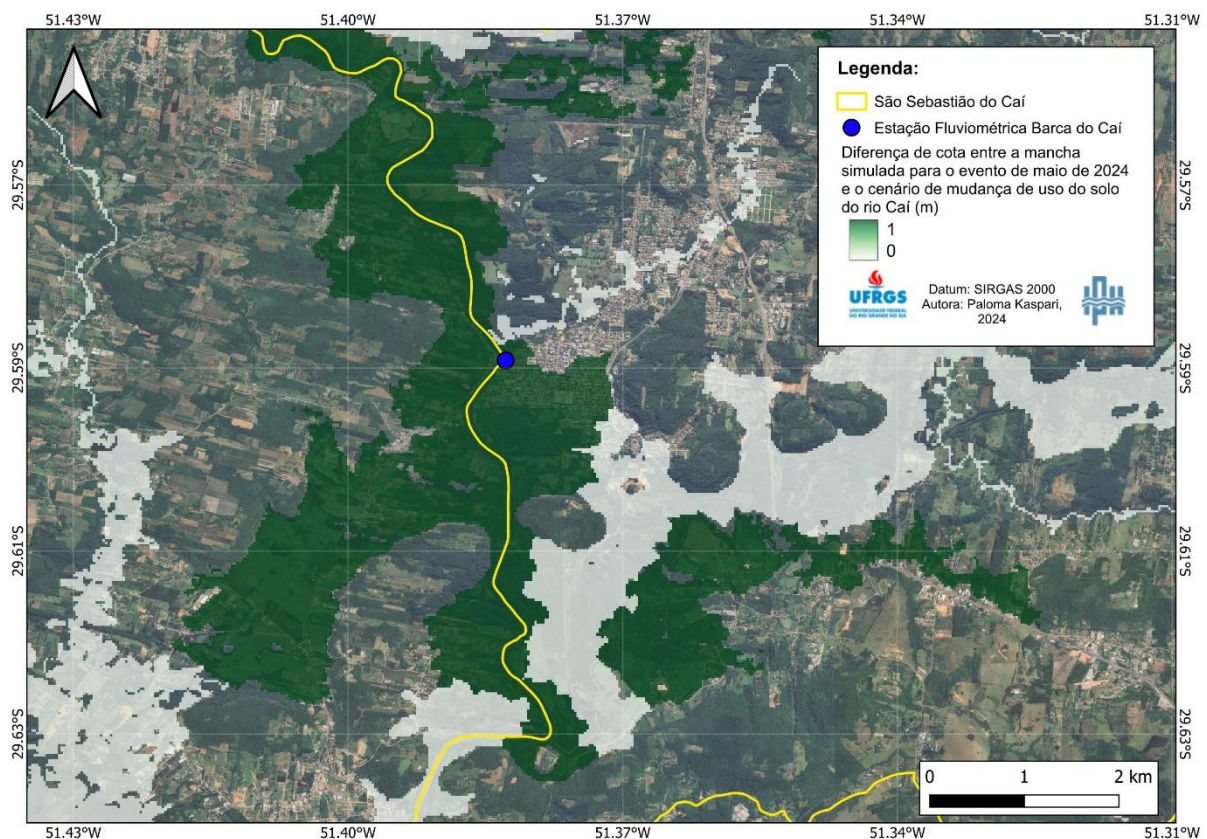


Figura 29 - Diferença entre cotas da mancha de inundação do evento extremo de maio de 2024 e o mudança de uso do solo na bacia.

A mancha resultante do cenário de reflorestamento atingiu os mesmos lugares que a mancha simulada, porém apresentou uma diferença de cota de 1 metro, o que poderia proporcionar menos danos a cidade, mas mesmo assim, reduziria minimamente os estragos causados com uma cheia desta magnitude. Além disso, ao observar os hidrogramas dos postos fluviométricos considerados, não houveram diferenças relevantes com este cenário, como é possível observar nas figuras abaixo. Isso se deve ao fato da bacia já ser bastante florestada. Cerca de 63% da cobertura do solo é considerada floresta, por isso, mesmo considerando um cenário extremo reflorestando o resto da bacia, como áreas

de agricultura e campo, não haveria alteração no impacto de uma cheia extrema como a de 2024.

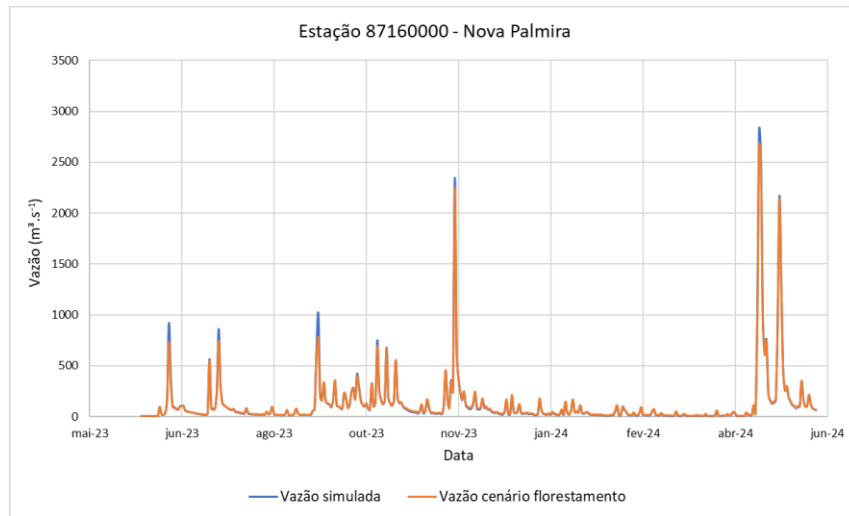


Figura 30 - Gráfico comparando simulado x cenário de florestamento para estação Nova Palmira.

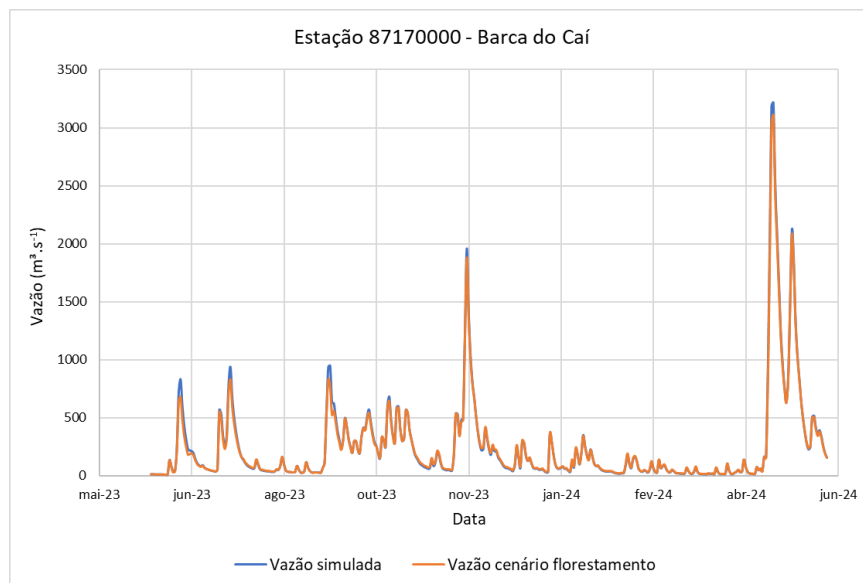


Figura 31 - Gráfico comparando simulado x cenário de florestamento para estação Barca do Caí.

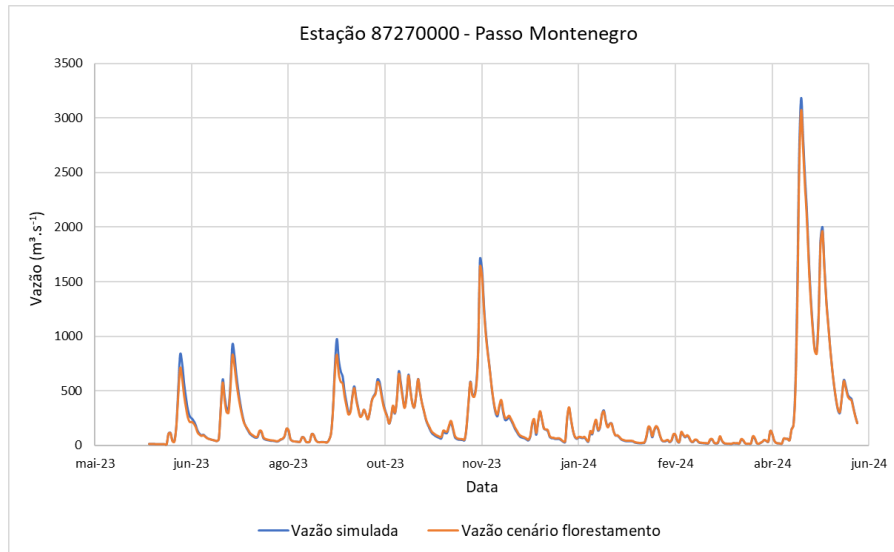


Figura 32 - Gráfico comparando simulado x cenário de florestamento para estação Passo Montenegro.

Além disso, outros fatores também implicam para não haver grandes alterações, como a alta declividade da bacia que facilita o escoamento da água, aumentando sua velocidade de drenagem para os cursos d'água principais, além dos elevados volumes de chuva dessa cheia, com acúmulo de 400mm a 450mm em cinco dias na bacia (POSSANTI et al, 2025).

7 INCERTEZAS

Podem ser destacadas diversas incertezas relacionadas a este estudo, como a topobatimetria utilizada no MGB e discretização do modelo, calibração por enumeração realizada, assim como incertezas relacionadas aos dados utilizados, visto que é uma bacia relativamente grande e possui somente três estações fluviométricas com dados históricos consistidos, sendo que uma tinha dados somente até o ano de 2015.

Mesmo utilizando o MDE ANADEM corrigido para o efeito da vegetação com resolução de 30 metros, pode acontecer do mesmo apresentar elevações mais altas, principalmente em áreas urbanas, que interfere na capacidade do modelo de representar as manchas de inundações com precisão, como visualizado na Figura 23 e apresentado por Giordani (2020).

Outra incerteza acerca desse estudo está na discretização das minibacias do MGB em trechos de rio que apresentasse 7km no modelo. Esse tamanho de trecho de rio pode influenciar na representação de um município por exemplo, ou causar dissipação numérica acentuada da onda de cheia, podendo causar incertezas nas análises em escala local (ALVES et al, 2019). Além disso, o modelo MGB apresenta sensibilidade a parâmetros como profundidade, largura, coeficiente de Manning, precipitação, área alagada e armazenamento máximo do solo (PAIVA et al, 2013). Sendo assim, para obter um resultado melhor, é indicado melhorar as estimativas dos parâmetros hidráulicos e as relações geomorfológicas. Recomenda-se para estudos futuros, utilizar profundidades e larguras medidas em campo dos trechos de rio simulados, além de procurar minimizar as incertezas relacionados aos MDEs.

8 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho teve como objetivo principal fazer um prognósticos sobre a mitigação dos impactos da cheia de maio de 2024 que ocorreu no Rio Grande do Sul e atingiu a cidade de São Sebastião do Caí, analisando o máximo impacto de alterações drásticas na bacia, a fim diminuir as consequências de cheias dessa magnitude. A partir desse objetivo, foram definidos dois cenários para poder analisar diferentes soluções para o enfrentamento de cheias dessas magnitudes na cidade. O primeiro cenário simulou o rebaixamento da calha do rio Caí a montante e a jusante da cidade em cerca de 7 metros. O segundo cenário simulou uma intervenção no uso do solo da bacia, alterando grande parte dela para floresta.

De modo a representar fielmente o evento extremo de maio de 2024, a mancha de inundação teve sua calibração levando em consideração diversos parâmetros, como: comparação visual do hidrograma observado x simulado, avaliação do coeficiente Nash e Nash-log para cada estação, análise visual do raster de inundação e análise visual da largura e profundidade gerada para cada minibacia. Com isso, foi gerado uma mancha que representou, de maneira razoável (mas ainda assim incompleta), a dimensão do evento. Além disso, os coeficientes de Nash e Nash-log dos hidrogramas observados x simulados obtiveram resultados considerados bons.

O cenário de rebaixamento da calha do rio resultou numa mancha de inundação de mesma dimensão da mancha simulada para o evento extremo de maio de 2024 e uma diferença de 2 metros



de cota na cidade de São Sebastião do Caí. Isso demonstrou que, apesar da redução da altura da água na cidade, ainda assim não diminuiria o impacto de grandes cheias na cidade, além dos enormes custos envolvendo a alternativa.

O cenário de reflorestamento total da bacia também resultou em uma mancha de inundação bem semelhante a gerada pela simulação do evento de maio de 2024 e apenas um metro de diferença entre as cotas simuladas e este cenário. Apesar desses benefícios, mesmo em um cenário extremo de reflorestamento total da bacia, o impacto na cheia foi limitado. Assim, ambos os cenários não alteraram de maneira relevante, o impacto de uma cheia extrema dessa proporção na cidade.

Conclui-se por fim, que para eventos extremos como de maio de 2024, é necessário pensar em várias alternativas e não existe uma solução única, especialmente aquelas focadas exclusivamente em obras de engenharia como canais e dragagens (IPH-GESPLA, 2024 a). Mesmo tendo em vista que o cenários simulados são uma extrapolação da realidade, é importante analisar e testar o máximo impacto que alterações drásticas na bacia podem gerar.

Portanto, para eventos extremos como o de maio de 2024, é necessário que o foco não seja exclusivo nas obras de engenharia, mas em uma união entre as diversas áreas do conhecimento que trabalham em ações de enfrentamento às inundações.



9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Maria Eduarda Pereira; FAN, Fernando Mainardi; FLEISCHMANN, Ayan Santos. **Simulação de rompimento de barragens em cascata com o Modelo MGB**. In: 2019, Fóz do Iguaçu. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Fóz do Iguaçu: ABRH, 2019. p. 1–10

ALVES, Maria Eduarda Pereira; FAN, Fernando Mainardi. 2020 a **Impactos de relações geomorfológicas nas escalas local, regional e nacional na modelagem hidrológica e hidrodinâmica**. In: 2020, Campinas. XIV Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Campinas: ABRH, 2020. p. 1–8.

ALVES, M.E.; MEYER, A.O; FAN, F.M.; PAIVA, R.C.D. 2020 b. **Manual de aplicação do modelo MGB utilizando o IPH-HYDRO Tools**. Manual Técnico, HGE, IPH, UFRGS.

BrasildeFato, 2024. **RS: presidente do comitê do Rio Caí critica retomada de projeto para contenção de cheias: 'inseguro e incompleto'**. Disponível em: [RS: presidente do comitê do Rio Caí critica retomada de | Geral](#). Acesso em: 15 nov 24.

BARBEDO, R.; Fernandez, G. M. R.; OLIVEIRA, R. C.; LAIPELT, L.; FAN, F. COLLISCHONN, W. (2022). **Manual de Aplicação BHO2MGB**. V 0.1. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/bho2mgb/> Acesso em: 16 nov. 24.

COLLISCHONN, W., ALLASIA, D., DA SILVA, B. C., & TUCCI, C. E. M. (2007). **The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling**. Hydrological Sciences Journal, 52(5), 878–895. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>

COLLISCHONN, Walter et al. Manual de Referência Teórica do MGB. [S. l.]: HGE, IPH, UFRGS, 2020 a.

COLLISCHONN, Walter; FAN, Fernando Mainardi; POSSANTTI, Iporã; DORNELLES, Fernando; PAIVA, Rodrigo; SAMPAIO, Matheus; MICHEL, Gean; MAGALHÃES FILHO, Fernando J. C.; MORAES, Sofia Royer; MARCUZZO, Francisco Fernando Noronha; MICHEL, Rossano Dalla Lana; BESKOW, Tamara Leitzke Caldeira; BESKOW, Samuel; FERNANDES, Elisa; LAIPELT, Leonardo; RUFFO, Anderson; KOBAYAMA, Masato; COLLORES, Gilberto Loguercio; BUFFON, Franco; DUARTE, Emanuel; LIMA, Stefany; MEIRELLES, Fernando S. C.; ALLASIA, Daniel. 2025 (aceito). **The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in southern Brazil**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH, ISSN 1415-4366. V. 1, 2025

CORREIO DO POVO, 2024. **São Sebastião do Caí finaliza projeto que prevê desassoreamento do Rio Caí e arroios na cidade**. Disponível em: . Acesso em: 26 dez. 24.



CNN Brasil. **Rio Grande do Sul: entre secas e inundações, estado vive eventos extremos com sinais de mudanças climáticas.** 21 maio 2024. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/rio-grande-do-sul-entre-secas-e-inundacoes-estado-vive-eventos-extremos-com-sinais-de-mudancas-climaticas/>. Acesso em: 25 dez. 2024.

FAN, F. M., FLEISCHMANN, A. S., COLLISCHONN, W., AMES, D. P., & RIGO, D. (2015b). **Large scale analytical water quality model coupled with GIS for simulation of point sourced pollutant discharges.** Environmental Modelling & Software. Volume 64, 58-71.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. (2013). **Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume (RBRH), v. 19, n.1, p. 243-254.

FLORES-COELHO, Caio Fernando (2023). **Apologia do fluxo: ou sobre o antropoceno no Rio Grande do Sul e a percepção da paisagem no rio Caí.** 2023. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em História, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS).

LARENTIS, D. G., NOGARE, M., TUCCI, C. E. M., POHLMANN, P. (2020). **Procedimentos e critérios para zoneamento de planícies de inundação em áreas urbanas.** Revista de Gestão de Água da América Latina, 17, e13. <https://doi.org/10.21168/rega.v17e13>

LOPES, V. A. R. (2015). **Modelagem hidrológica integrada da bacia hidrográfica da Laguna dos Patos e seus complexos lagunares usando o modelo MGB-IPH com propagação inercial de vazões.** Trabalho de Conclusão de Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/171216>

G1. **Tragédias climáticas no RS: entenda as diferenças entre os fenômenos extremos.** 3 maio 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/03/tragedias-climaticas-rs-entenda-diferencas.ghtml>. Acesso em: 25 dez. 2024.

G1. **Ciclone do RS é o maior desastre natural relacionado a chuvas nos últimos 40 anos, diz governo.** 20 jun. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2023/06/20/ciclone-do-rs-e-o-maior-desastre-natural-relacionado-a-chuvas-nos-ultimos-40-anos-diz-governo.ghtml>. Acesso em: 25 dez. 2024.

GIORDANI, Bruna Baggio. **Uso de dados não sistemáticos para calibração hidrodinâmica do modelo MGB: estudo de caso da região do Vale do Rio Taquari (RS) para a inundação de julho de 2020.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental)—Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.



HIDROLOGIA DE GRANDE ESCALA (HGE), s.d. IPH-Hydro Tools. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – UFRGS. Disponível em: [IPH-Hydro Tools | Hidrologia de Grande Escala](#). Acesso em: 14 nov 24.

FATO NOVO, 2024. **Diques, corta-rio e estações de bombeamento são apresentadas como soluções para enchente.** Disponível em: [Diques, corta-rio e estações de bombeamento são apresentados como solução para as enchentes – Fato Novo](#). Acesso em:

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS (IPH). 2024 a. Nota Técnica - Núcleo de Pesquisa em Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos - GESPLA . **A cheia de 2024 no estado do Rio Grande do Sul e as linhas de ação para a resiliência contra eventos extremos.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2024. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/iph>. Acesso em: 25 dez. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS (IPH). 2024 b. **Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: Chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2024. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/iph/wp-content/uploads/2024/05/CriteriosAdaptacaoMudancaClimaticaChuvasCheiasExtremasSul.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2024.

MEDEIROS, M. S; Fleischmann, A. S.; OLIVEIRA, A. M.; CORATI, B. K.; FAN, F. M.; MARTINBIANCHO, G. K.; JARDIM, P. F.; CORREA, S. W.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W. (2019). **Manual De Exemplo De Aplicação Do Modelo Mgb 2018 Utilizando O Iph-Hydro Tools.** Disponível em: [manual_MGB_2018_QGIS_FINAL_02.pdf manual_MGB_2018_QGIS_FINAL_02.pdf](#). Acesso em: 30 set 2024.

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

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. Journal of Hydrology, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

PAIVA, Marllus Henrique Ribeiro de; SANTIAGO, Aníbal da Fonseca; DIAS, Livia Cristina Pinto; CASTRO, Ana Letícia Pilz de; GOMES, Paula Cristine Silva (2022). **Simulação e calibração do modelo hidrológico MGB-IPH para as sub-bacias hidrográficas do rio Piranga e Piracicaba – MG.** In: **I SIMPÓSIO NACIONAL DE MECÂNICA DOS FLUIDOS E HIDRÁULICA**, 1., 2022, Ouro Preto – Minas Gerais.

Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Miranda, P. T., Fagundes, H.O., W., Kolling, A., Castro, L., Rossi, J.,



Matte, G., Laipelt, L., Alves, W., Petry, I., 2024. **Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional**. CLIMA: Impactos de Mudanças Climáticas em Extremos de Vazão (Cheias e Estiagens) – Relatório Final. IPH-ANA-HGE-CLIMA-A3. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].

Prefeitura Municipal de São Sebastião do Caí, (2024). São Sebastião do Caí enfrenta a maior enchente de seus 149 anos de história. Disponível em: [São Sebastião do Caí enfrenta a maior enchente de seus 149 anos de história | Prefeitura Municipal de São Sebastião do Caí](#). Acesso em: 25 nov 2024.

Possantti, I.; Aguirre, A.; Alberti, C.; Andrades Filho, C.; Azeredo, L.; Balbon, J.; Barbedo, R.; Barcelos, M.; Becker, F.; Bedin, M.; Bregalda, N.; Cacciatore, J.; Camana, M.; Camargo, P.; Cantor, G.; Cardozo, T.; Cargnin, B.; Carrard, G.; Castilhos, M.; Cazanova, R.; Chiarelli, F.; Collishonn, W.; Cornely, A.; Cremon, É.; Cunha, L.; Cunha, R.; Cárdenas, S.; Dorneles, J.; Dornelles, F.; Eckhardt, R.; Fan, F.; Froner, M.; Giacom, B.; Giasson, S.; Goldenfum, J.; González-Ávila, I.; Gonçalves, C.; Gonçalves, G.; Guasselli, L.; Guimarães, E.; Guimarães, E.; Hellmann, A.; Herrmann, P.; Horstmann, G.; Iablonovski, G.; Iescheck, A.; Kipper, P.; Kobayama, M.; Krasner, M.; Krob, L.; Kuele, P.; Laipelt, L.; Lutz, V.; Maciel, J.; Magalhães, F.; Mallet, J.; Marques, B.; Marques, G.; Meirelles, F.; Mexias, L.; Michel, G.; Michel, R.; Mincarone, M.; Moura, E.; Müller, J.; Neves, É.; Nicolini, I.; Nonnemacher, L.; Novakoski, K.; Oliveira, G.; Oliveira, M.; Ott, P.; Paiva, R.; Peres, L.; Petry, L.; Quevedo, R.; Quintela, R.; Ramos, M.; Rauber, A.; Reis, M.; Ribeiro, M.; Righi, M.; Risso, A.; Rodrigues, R.; Roitman, A.; Rorato, G.; Royer, S.; Ruhoff, A.; Ruoso, E.; Sampaio, M.; Schabbach, L.; Schiaffino, M.; Schmitt, H.; Schumacher, R.; Schwarzer, G.; Serrano, N.; Sigallis, A.; Silva, M.; Silva, S.; Sluter, C.; Soares, L.; Soares, V.; Sousa, L.; Souza, A.; Tschiedel, A.; Ucha, L.; Umbelino, G.; Utzig, E.; Zambrano, F. (2024). **Banco de dados das cheias na Região Hidrográfica do Lago Guaíba em Maio de 2024** (versão 1.2) [Data set]. Zenodo. <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.11164049>

RECKZIEGEL, W. Bernadete (2007). **Levantamento dos desastres desencadeados por eventos naturais adversos no Estado do Rio Grande do Sul no período de 1980 a 2005**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007, v. 1

RIO GRANDE DO SUL (RS). Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. Departamento de Planejamento Governamental (2022). **Desastres naturais no Rio Grande do Sul: estudo sobre as ocorrências no período 2003-2021**. Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, 2022.

RIO GRANDE DO SUL. **Chuvas de novembro afetaram quase 700 mil pessoas no estado**. 7 dez. 2024. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/chuvas-de-novembro-afetaram-quase-700-mil-pessoas-no-estado>. Acesso em: 25 dez. 2024.



OLIVEIRA, Guilherme Garcia de. **Modelos para previsão, espacialização e análise das áreas inundáveis na Bacia Hidrográfica do Rio Caí, RS**. 2010. 149 p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (SEMA), 2007. Departamento de Recursos Hídricos. **1ª Etapa Do Plano De Bacia Do Rio Caí: Consolidação Do Conhecimento Sobre Recursos Hídricos E Enquadramento Dos Recursos Hídricos Superficiais**. Relatório Fase A. Junho/2007.

Serviço Geológico do Brasil (SGB), s.d. Bacia do Rio Caí – Apresentação. Disponível em: sgb.gov.br/sace/cai_apresentacao.html. Acesso em: 26 dez. 24.

SIQUEIRA, V. A. ; FLEISCHMANN, A. S. ; JARDIM, P. F. ; FAN, F. M. ; COLLISCHONN, W. . **IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology aquisition in open-source environment**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, p. 274-287, 2016.

VON AHN, Bianca dos Santos; MARQUES, Guilherme Fernandes. 2018. **Importância de explorar medidas de adaptação e mitigação na redução dos danos causados pelas inundações**. I Encontro Nacional de Desastres Naturais, Porto Alegre, RS. 2018.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília. 2005.

TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2007.

TUCCI, Carlos E.M.; COLLISCHONN, Walter. Drenagem urbana e controle de erosão. **VI Simpósio nacional de controle da erosão, Presidente Prudente, São Paulo**, 1998.