



## **Relatório Técnico**

**Estudo Hidrológico para o desenvolvimento do anteprojeto de Engenharia para a reconstrução de passagem molhada.**

**Meta 06 do Plano de trabalho da Defesa Civil com protocolo nº REC-RS-4313102-20240508-01 "Reconstrução da passagem molhada sobre o Rio Soturno (Balneário Municipal) no município de Nova Palma/RS"**

**Santa Maria, Setembro de 2025**



**GREEN & BLUE**

Centro de Tecnologias

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA**

**ESTUDO HIDROLÓGICO PARA O DESENVOLVIMENTO DO**  
**ANTEPROJETO DE ENGENHARIA**  
**PARA A RECONSTRUÇÃO DE PASSAGEM MOLHADA**

**DISPENSA DE LICITAÇÃO Nº 243/2025**  
**Meta 06 Passagem molhada Sobre o Rio Soturno (Balneário**  
**Municipal), Município de Nova Palma, RS**



Fonte Imagem: Plano de trabalho PROTOCOLO Nº REC-RS- 4313102-20240508-01

Nova Palma

Setembro de 2025

## Sumário

|                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. OBJETO .....                                                                                                                                            | 7  |
| 2. INTRODUÇÃO.....                                                                                                                                         | 7  |
| 3. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA.....                                                                                                               | 11 |
| 3.1 Localização e clima.....                                                                                                                               | 11 |
| 3.2 Relevo, geomorfologia e pedologia .....                                                                                                                | 13 |
| 3.3 Uso e ocupação do solo .....                                                                                                                           | 18 |
| 4. METODOLOGIA.....                                                                                                                                        | 19 |
| 4.1. Coleta de dados.....                                                                                                                                  | 20 |
| 4.1.1 Dados hidrometeorológicos .....                                                                                                                      | 20 |
| 4.1.2 Dados topobatimétricos .....                                                                                                                         | 21 |
| 4.2. Processamento de Dados para Determinação de Vazão .....                                                                                               | 21 |
| 4.2.1 Análise estatística dos dados hidrometeorológicos .....                                                                                              | 21 |
| 4.2.3 Adequação dos critérios de projeto seguindo as recomendações feita pelo Governo do RS para garantir a resiliência climática das estruturas .....     | 22 |
| 4.3. Modelagem Hidrológica.....                                                                                                                            | 24 |
| 4.4. Modelagem Hidráulica .....                                                                                                                            | 29 |
| 5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA PRECIPITAÇÃO E VAZÃO .....                                                                                                       | 31 |
| 5.1 Estatísticas dos dados pluviométricos .....                                                                                                            | 31 |
| 5.2 Determinação da precipitação de projeto conforme recomendações feita pelo Governo do RS para garantir a resiliência climática das infraestruturas..... | 35 |
| 6. DETERMINAÇÃO DE VAZÃO DE PROJETO .....                                                                                                                  | 36 |
| 6.1 Estimativa do tempo de concentração.....                                                                                                               | 36 |

---

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| 6.2 Hietograma de projeto.....                           | 38 |
| 6.3 Ajuste do modelo hidrológico.....                    | 40 |
| 6.3.1 Evento de calibração.....                          | 40 |
| 6.3.2 Topologia de simulação .....                       | 42 |
| 6.3.3 Calibração do parâmetro CN .....                   | 43 |
| 6.4 Vazão de Projeto .....                               | 44 |
| 7. DETERMINAÇÃO DAS COTAS E VELOCIDADES DE PROJETO ..... | 46 |
| 7.1 Ajuste do modelo hidráulico .....                    | 46 |
| 7.2 Simulação das vazões de projeto .....                | 52 |
| 8. RECOMENDAÇÕES.....                                    | 61 |
| 9. EQUIPE TÉCNICA.....                                   | 63 |
| 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                     | 64 |

## RESUMO EXECUTIVO

Este relatório apresenta o estudo hidrológico e hidráulico do **Rio Soturno**, abrangendo a bacia hidrográfica até a passagem molhada da **Meta 06 do Plano de trabalho da Defesa Civil com protocolo nº REC-RS-4313102-20240508-01**, elaborado conforme as diretrizes da **IS-121/21** e demais normativas técnicas aplicáveis. O objetivo foi determinar as **vazões de projeto**, as **cotas máximas** e analisar o comportamento hidráulico no trecho da passagem molhada, fornecendo subsídios técnicos para o projeto da mesma. A análise hidrológica considerou o tempo de concentração estimado pelas equações do **DNOS (15,7 h)** e **Kirpich Modificada (15,9 h)**. A chuva de projeto foi definida com base na **relação IDF atualizada** para a região, incorporando informações da inundação de 2024, e distribuída no tempo pelo **Método dos Blocos Alternados**. A modelagem hidrológica foi desenvolvida no **HEC-HMS**, calibrada com base no evento de cheia de abril–maio de 2024, ajustando parâmetros como **Número de Curva (CN)**. O CN calibrado foi de **90**, representando **condição de solo saturado**. A modelagem hidráulica foi realizada no **HEC-RAS**, em regime não permanente, utilizando dados topográficos e batimétricos detalhados, complementados com seções interpoladas, com ajustamento de valores de **coeficientes de rugosidade**. A calibração reproduziu com alta precisão a cota máxima observada no evento de 2024.

### Principais resultados obtidos:

- **Vazões de projeto:**
  - TR = 100 anos → **1.606,58 m<sup>3</sup>/s**
  - TR = 450 anos → **2.248,83 m<sup>3</sup>/s**
- **Cotas máximas de inundação no eixo da passagem molhada:**
  - TR = 100 anos → **81,31 m**
  - TR = 450 anos → **82,58 m**
- **Velocidades médias no eixo da passagem molhada:**
  - TR = 100 anos → **2,50 m/s**
  - TR = 450 anos → **2,82 m/s**

A diferença de **1,27** entre as cotas máximas para TR 100 e TR 450 anos evidencia a importância de adotar cenários mais severos para garantir **resiliência estrutural**. Deve-se destacar também que as **velocidades do escoamento na região de montante do eixo da passagem molhada foram de  $3,77 \text{ m.s}^{-1}$  e  $4,45 \text{ m.s}^{-1}$** , para os períodos de recorrência de 100 e 450 anos, respectivamente.

Recomenda-se que, caso seja mantida a cota de **74,29 m** (cota original aproximada da passagem molhada destruída) para a reconstrução da passagem molhada, seja observada a sobrelevação da lâmina de água sobre a mesma, da ordem de **8,29 m** (TR 450), bem como as velocidades que superam os  **$4,45 \text{ m.s}^{-1}$  na região da aproximação da passagem molhada**. Essas condições aumentam as solicitações hidráulicas sobre a passagem molhada, e reforçam a necessidade de obras para garantir a estabilidade da estrutura.

## 1. OBJETO

Este relatório refere à realização de estudo hidrológico para apoiar o desenvolvimento do anteprojeto para a reconstrução de Obras de Arte Especiais (OEA) – passagem molhada em concreto armado, a qual foi destruída por desastre natural (chuvas de grandes proporções) ocorrido no dia 01.05.2024, que compõem a Dispensa de Licitação nº 243/2025, com Protocolo da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC): REC-RS-4313102-20240508-01, Meta nº 06.

## 2. INTRODUÇÃO

Entre o final de abril e maio de 2024, o Rio Grande do Sul sofreu um episódio hidrometeorológico excepcional, classificado pelo governo estadual como a maior catástrofe climática da história do estado. Em diversos municípios choveu, entre 27/04 e 02/05/2024, de 500 a 700 mm — valores próximos a um terço da média anual — com reflexos diretos no Lago Guaíba, que atingiu 5,37 m em 05/05/2024, superando os registros de 1941 e 2023. O evento afetou 478 municípios e cerca de 2,4 milhões de pessoas, com 183 óbitos confirmados ao longo de 2024, além de danos expressivos à habitação, à infraestrutura e às atividades econômicas (agropecuária, indústria e comércio). Em 2025, o estado voltou a registrar episódios de chuva volumosa, com impactos relevantes em abril, maio e, especialmente, entre 14 e 20 de junho de 2025. Balanços oficiais indicam, para as chuvas de junho/2025, 174 municípios em emergência, 10.373 desalojados, além de óbitos e desaparecidos, o que motivou nova edição do programa estadual de assistência às famílias (Decreto nº 58.235, de 25/06/2025). Esses números evidenciam a recorrência e a abrangência dos impactos hidrológicos no território gaúcho no biênio analisado. Do ponto de vista hidrometeorológico, registros do INMET e de órgãos estaduais reforçam o caráter histórico dos acumulados de 2024 (e a persistência de anomalias em 2025): por exemplo, Santa Maria aferiu 213,6 mm em 01/05/2024, recorde centenário para a estação local,

enquanto Caxias do Sul registrou 266,2 mm em 02/05/2024. Um ano depois, as sínteses institucionais ainda apontavam 478 de 497 municípios com algum tipo de impacto e aproximadamente 2,4 milhões de habitantes atingidos.

No evento hidrometeorológico de 2024, o município de Nova Palma foi muito afetado em termos de infraestrutura, sofrendo o colapso de mais de dez pontes e diversas infraestruturas da região central do município como no interior. Para a reconstrução das estruturas de pontes danificadas, foi exigido pela defesa civil a necessidade de estudo hidrológico para elaboração do anteprojeto de Engenharia para a reconstrução de Obras de Arte Especiais (OAE) - pontes em concreto armado, destruídas pelo desastre natural (chuvas intensas) ocorrido em 01.05.2024, conforme os protocolos da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil - SEDEC, vinculada ao Ministério da Integração e Desenvolvimento Regional - MIDR, o Estudo Técnico Preliminar nº 716/2024 e o Termo de Referência nº 557/2024.

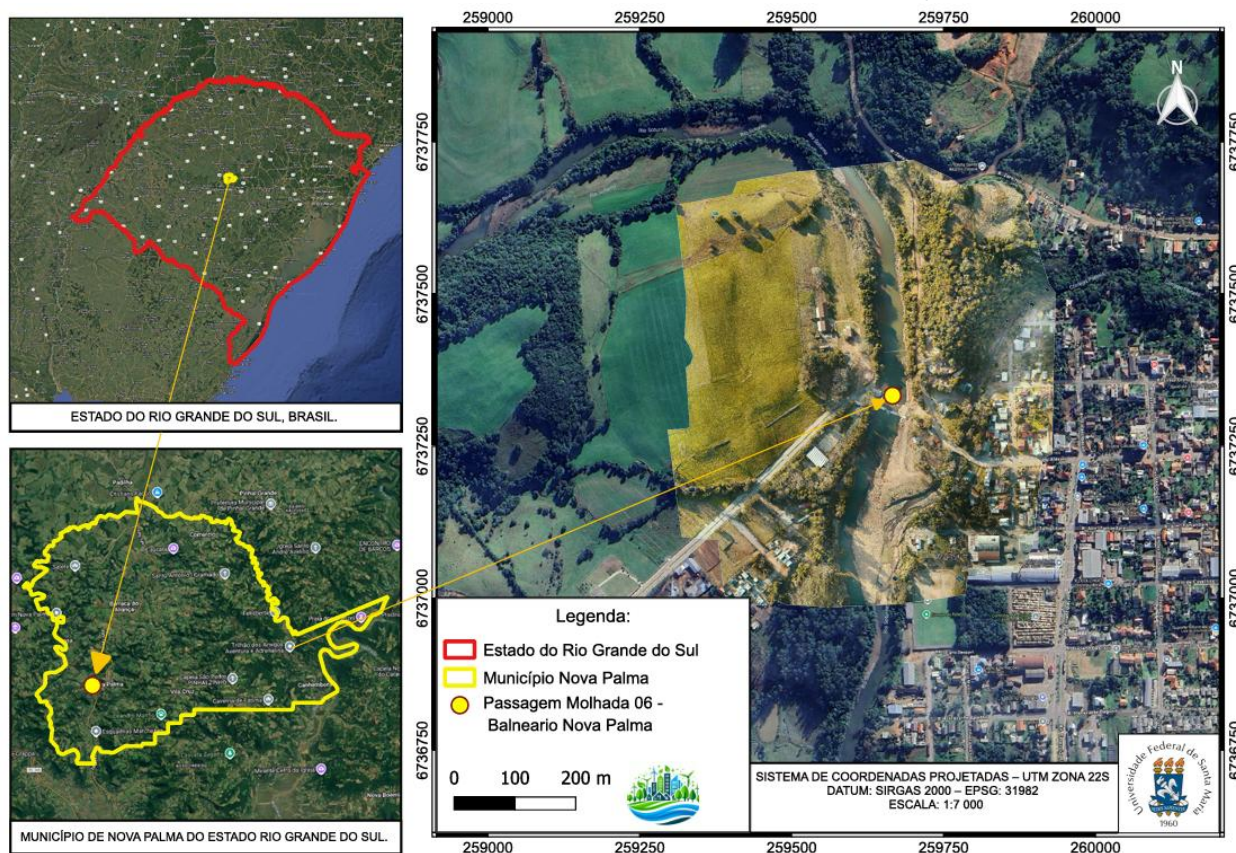
Neste relatório são apresentadas as atividades correspondentes ao ESTUDO HIDROLÓGICO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ANTEPROJETO DE ENGENHARIA PARA A RECONSTRUÇÃO DE PASSAGEM MOLHADA que compõem a Dispensa de Licitação nº 243/2025 -com Protocolo SEDEC: Protocolo REC-RS-4313102-20240508-01 vinculado ao Processo 59053.019971/2024-36, conforme discriminado na Tabela 1 e Figura 1.

*Tabela 1 Passagem molhada que precisa ser reconstruída em Nova Palma e integra a DISPENSA DE LICITAÇÃO Nº 243/2025.*

| Descrição                                                                                                                                                                                                                             | Localização         | Protocolo REC-RS    | Meta    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------|
| Reconstrução de passagem molhada sobre o Rio Soturno (Balneário Municipal) na localização (lat 29°28'13.74"S e long 53°28'42.30"O) com dimensões de larg 6,00m x comp 70,00m (420,00 metros quadrados) no município de Nova Palma /RS | Balneário Municipal | 4313102-20240508-01 | Meta 06 |

REC-RS-4313102-20240508-01

**Figura 1. Localização da passagem molhada do Balneário Municipal que precisa ser reconstruída em Nova Palma e integra a DISPENSA DE LICITAÇÃO Nº 243/2025.**



Fonte: Autores.

A cheia extrema, provocada pelas chuvas duradouras e volumosas ocorridas no ano de 2024 destruíram a passagem molhada do Balneário Municipal sobre o Rio Soturno, afluente do Rio Jacuí. A Figura 2 apresenta uma imagem da passagem molhada antes do evento hidrológico de maio de 2024 e a Figura 3 uma imagem do local da passagem molhada após o evento hidrológico de maio de 2024.

O estudo hidrológico visando à reconstrução da passagem molhada foi realizado em nível de anteprojeto, de acordo com as recomendações da IS-121 / 21 INSTRUÇÃO DE SERVIÇO PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS HIDROLÓGICOS E PROJETOS DE DRENAGEM E DE OBRAS DE ARTE CORRENTES do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER) do Rio Grande do Sul.

Figura 2. Imagem de Google Earth com indicação da passagem molhada do Balneário Municipal (Meta 06) sobre o Rio Soturno.



FONTE: Google Earth

Figura 3. Local onde estava localizada a passagem molhada do Balneário Municipal (Meta 06) sobre o Rio Soturno, após o evento hidrológico de maio de 2024



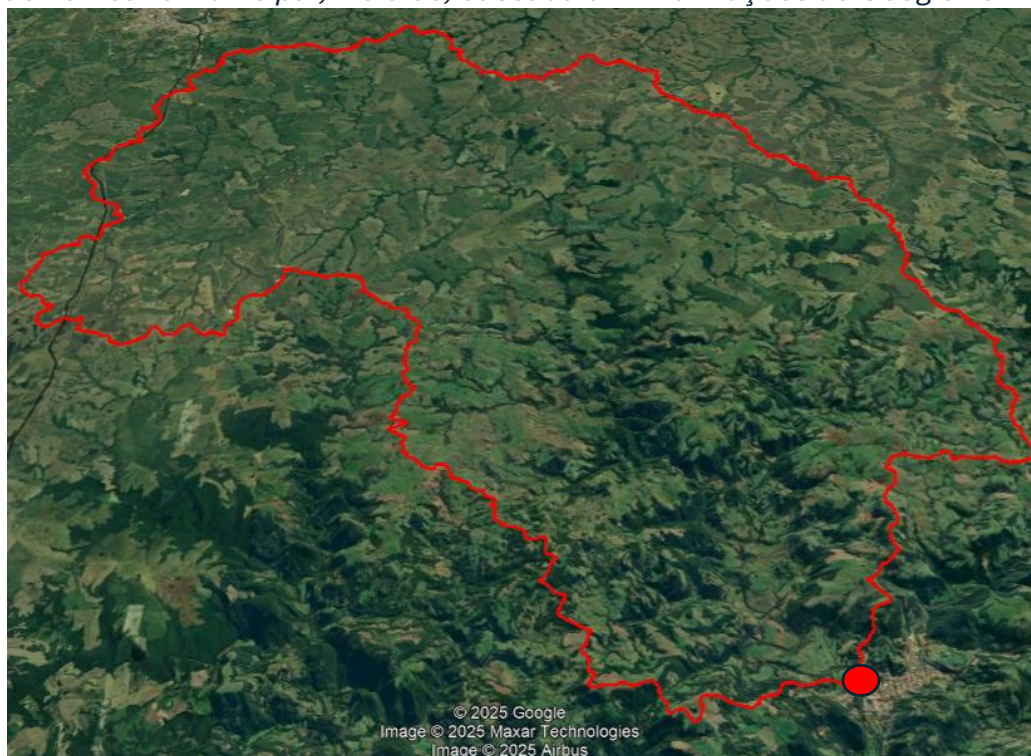
Fonte: Autores

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

#### 3.1 Localização e clima

A passagem molhada do Balneário Municipal, objeto desse estudo, está localizada no rio Soturno, afluente do rio Jacuí. A região onde a passagem molhada está localizada encontra-se na transição da região de cabeceira da bacia hidrográfica, localizada na encosta do rebordo do Planalto Gaúcho e as áreas de várzea que possuem solos rasos, com bastante presença de areia e seixos. A bacia caracteriza-se pela presença de vários afluentes a montante, conforme pode ser observado na Figura 4 .

*Figura 4. Visão esquemática da bacia hidrográfica do Rio Soturno até a passagem molhada do Balneário Municipal, Meta 06, baseada em informações do Google Earth.*



Fonte: Elaborado pelos autores com base em informações do Google Earth.

O clima na região é do tipo Cfa (Subtropical úmido), conforme a classificação de Köppen–Geiger (Peel et al., 2007), caracterizado por chuvas presentes durante todos os meses do ano. A temperatura média anual é de 23,4 °C, sendo a temperatura média do mês mais quente superior a 25°C, sendo que já foram registradas temperaturas máximas de até

40°C no verão, e mínimas de 0°C durante o inverno. As estações são bem definidas, principalmente entre inverno e verão, e a precipitação média anual é da ordem de 1.900 mm, sendo os meses de final do inverno e os de início da primavera os mais chuvosos, enquanto os meses do final do verão e do início de outono os mais secos. A umidade relativa do ar oscila entre 70% e 90% nos meses de maior precipitação pluviométrica, e de 50% a 60% nos meses menos chuvosos.

Conforme o DRH-SEMA (2020), entre os sistemas associados à instabilidade que mais atuam na bacia têm-se frentes frias e frentes quentes, sendo que estas duas são relacionadas a ondas baroclínicas que dão origem à ciclogêneses e ciclones extratropicais. As frentes demarcam o encontro de duas massas de ar de características distintas, como uma massa polar e uma tropical. A posição da Alta Subtropical do Atlântico Sul é forte moduladora do deslocamento das massas de ar ao Sul do Brasil. Na estação quente as pancadas de chuva de verão ocorrem devido às convecções geradas com o calor e a umidade que chegam do interior do continente. Este transporte de umidade e calor tem como principal responsável o jato de baixos níveis da América do Sul. Entretanto, o jato de baixos níveis atua significativamente o ano todo, muitas vezes antecedendo a chegada de frentes frias. Este jato também costuma se associar a Baixa do Chaco, um centro de baixa pressão intermitente e quente que se forma entre o noroeste da Argentina, Paraguai e Sul da Bolívia. Aprofunda-se com mais intensidade no verão, favorecendo o transporte mais intenso de calor e umidade para o Sul do Brasil. Nas estações de transição, primavera e outono, o jato subtropical de altos níveis costuma se localizar sobre a região, o que favorece o desenvolvimento de sistemas e complexos convectivos de mesoescala, que são aglomerados de tempestades organizadas e causam expressivos acumulados de precipitação.

Em relação à variabilidade interanual, o El Niño Oscilação Sul (ENOS) é a principal fonte moduladora na região. É definido como a oscilação da temperatura da superfície do mar (TSM) no Oceano Pacífico Tropical que causa mudanças nos ventos, pressão e na convecção da região, influenciando o clima em diferentes partes do globo (Alla, 1996; CPTEC-inpe, 2021) Quando está na sua fase quente, TSM com anomalia positiva, o

fenômeno denomina-se “El Niño” e quando está na sua fase fria, TSM com anomalia negativa, denomina-se “La Niña”. O El Niño apresenta tendência de aumento da precipitação no RS, principalmente na primavera, sendo que no verão não se observa influência clara. Em relação à temperatura, observa-se que no inverno eventos de *El Niño* favorecem a ocorrência de anomalias positivas, provocando invernos menos frios, devido ao posicionamento mais ao sul do Jato Polar e Subtropical de Altos Níveis, o que gera aumento de advecção quente de norte. Nos episódios de *La Niña* as influências são opostas às do *El Niño*, ou seja, com diminuição da precipitação em boa parte do ano e, no caso do inverno, diminuição da temperatura também.

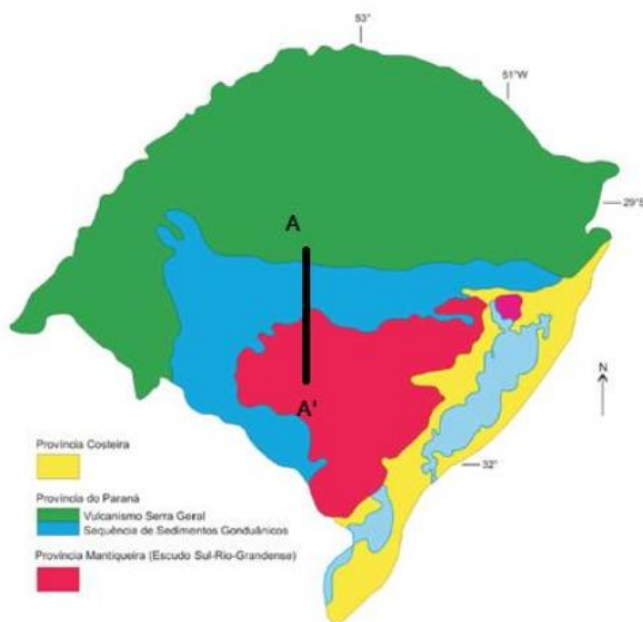
Ao se levar em conta as mudanças do clima, se percebe que desde 1979, no início das medições da temperatura da superfície da Terra por meio de sensores embarcados em satélites, observou-se um aumento em torno de 0,5°C, com um recorde observado em 2023, que superou os 2°C com relação aos níveis pré-industriais (1850-1900). Com este aquecimento, espera-se aumento na frequência da fase positiva do ENOS, mesmo que pequeno. Isso tende a contribuir para o aumento da umidade disponível na atmosfera e dos totais de precipitação no RS, uma vez que pequenas modificações na TSM (temperatura da superfície do mar) trazem resultados importantes. Entretanto, em um clima mais aquecido, as precipitações tendem a ocorrer de forma mais intensa e em menores intervalos de tempo, como ocorre no verão. Também, o tempo de permanência de nebulosidade é diminuído e da insolação aumentado; portanto, o clima de verão tende a ficar mais longo. Com isso, a evapotranspiração é aumentada, o que pode contribuir para aumento do tempo das estiagens, ao mesmo tempo em que contribui para o aumento das enxurradas nas sub-bacias.

### 3.2 Relevo, geomorfologia e pedologia

O Estado do Rio Grande do Sul pode ser compartimentado geologicamente em três grandes províncias: Província Mantiqueira, Província Paraná e Província Costeira. A Figura 5 ilustra estas províncias e um indicativo de corte A-A’ sobre a região central do Rio Grande do Sul. O detalhe do perfil deste corte é apresentado na Figura 6, onde se observa sobre as

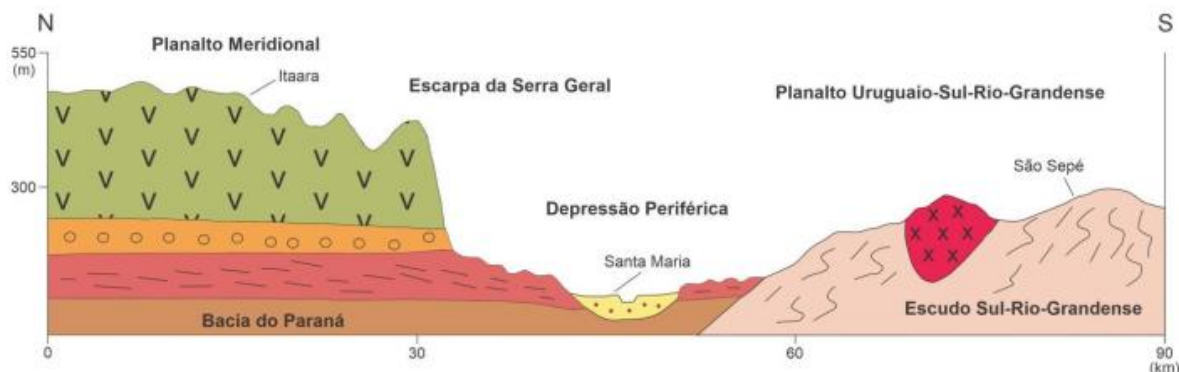
províncias da Mantiqueira e do Paraná duas regiões geomorfológicas: a Depressão Periférica e o Planalto Meridional. É nesta bacia sedimentar que ocorre o Aquífero Guaraní na unidade hidroestratigráfica Botucatu. Recobrimdo a pilha sedimentar empilham-se derrames vulcânicos que antecederam a fragmentação continental entre América do Sul e África formando a Serra Geral e os Campos de Cima da Serra.

*Figura 5. Províncias geológicas do Rio Grande do Sul (Wildner e Lopes). O corte A-A' representa o perfil característico da Região Central do Rio Grande do Sul.*



FONTE: DRH-SEMA(2020)

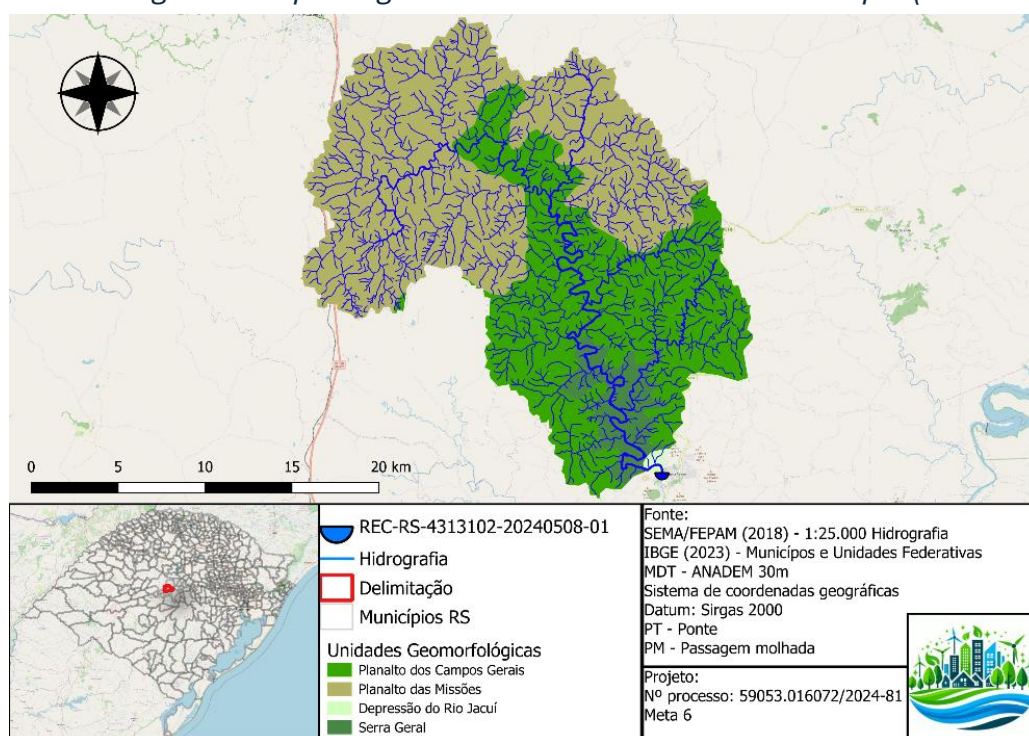
*Figura 6. Seção esquemática A-A' dos domínios geomorfológicos que ocorrem na Região Central do Rio Grande do Sul. Modificado de Dantas et al.*



FONTE: DRH-SEMA(2020)

Em relação à litologia da bacia hidrográfica do rio Soturno, predomina na região das cabeceiras da bacia hidrográfica a subunidade geomorfológica Planalto das Missões caracterizado por um relevo de colinas suaves e morrotes isolados, resultantes da evolução de rochas vulcânicas e areníticas. As altitudes variam de 200 metros, com declividades entre 5-15% e 15-30%, chegando a mais de 30% em algumas vertentes escarpadas. Na região central da bacia hidrográfica encontrasse a subunidade Geomorfológica Planalto dos campos gerais, caracterizado por um relevo acidentado, com vertentes íngremes e vales profundos, originado de derrames de lava basáltica e rochas pré-cambrianas do Escudo Sul-Rio-Grandense (Figura 7). Já na região mais próxima ao seu exutório encontra-se as unidades Depressão do Rio Jacuí e as planícies Alúvio-Coluvionares com características de depósitos sedimentares de canal, favorecendo os processos de deposição de sedimentos (Robaina, et al.,2010).

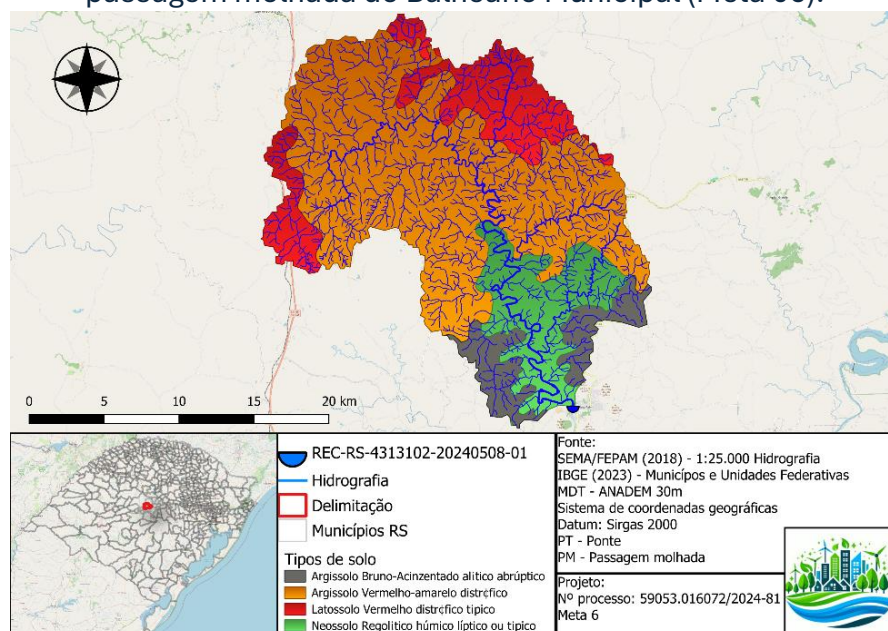
*Figura 7 Unidades geomorfológicas da bacia hidrográfica do Rio Soturno até o exutório da bacia hidrográfica na passagem molhada do Balneário Municipal (Meta 06).*



FONTE: Adaptado do Projeto RADAMBRASIL (1986)

Em relação aos solos da bacia hidrográfica, predominam os solos argilosos nas regiões de cabeceira e central, sendo divididos em Argissolos Bruno-Acinzentados Alítico Abruptico e Argissolos Vermelho-Amarelo Distrófico. Nas regiões de vales existe a presença de Neossolos Regolíticos Húmico Lúptico como pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 Distribuição dos solos na Bacia Hidrográfica do Rio Soturno até o exutório na passagem molhada do Balneário Municipal (Meta 06).



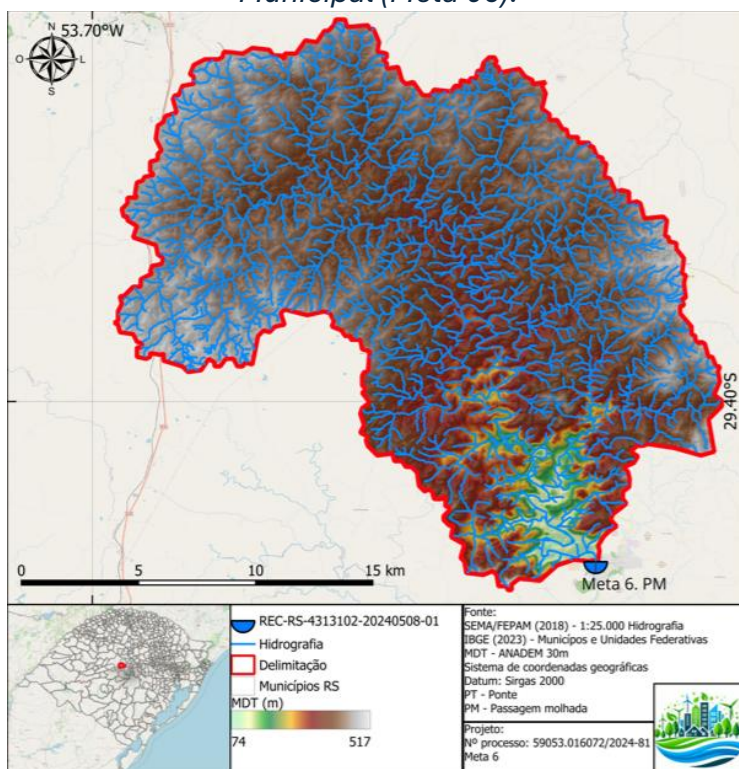
FONTE: elaborado pelos autores com base em Gonçalves dos Santos et al. (2018) e Streck et al. (2018).

Os solos Argissolos Bruno-Acinzentados Alítico Abruptico se distinguem por terem um horizonte B textural com acúmulo de argila, cores que variam de acinzentadas a avermelhadas, e podem apresentar o caráter alítico, com baixa atividade da argila e alta saturação por bases. Estes solos apresentam diferença textural entre as camadas podendo dificultar a infiltração da água e aumentar o risco de erosão necessitando de manejo conservacionista para combater a erosão. Os solos Argissolos Vermelho-Amarelo Distrófico são solos caracterizados pela presença de um horizonte de acumulação de argila (B textural) com coloração vermelho-amarelada e baixa saturação por bases (distróficos),

podem apresentar textura arenosa na superfície (característica arênica ou espessarênica) com aumento de argila em profundidade, o que pode levar a problemas de erosão e em geral, apresentam boa capacidade de infiltração de água na superfície, mas podem ter problemas de drenagem interna devido à camada de argila. Já os Neossolos Regolíticos são solos pouco desenvolvidos não hidromórficos e de textura normalmente arenosa, apresentando alta erodibilidade principalmente em declives mais acentuados (EMBRAPA 2018).

Em relação ao relevo, a bacia hidrográfica do rio Soturno é muito acidentada, com cotas altimétricas variando de 509,25 m a aproximadamente 66,50 m na região junto à passagem molhada do Balneário Municipal (Figura 9). Essa condição topográfica, com vale do rio encaixado, contribui para que a bacia hidrográfica tenha respostas rápidas a eventos de precipitação e um aumento significativo de vazão, sendo altamente suscetível à formação de cheias que podem se apresentar sob a forma de enxurradas.

*Figura 9 Relevo da bacia hidrográfica do Rio Soturno até a passagem molhada do Balneário Municipal (Meta 06).*



### 3.3 Uso e ocupação do solo

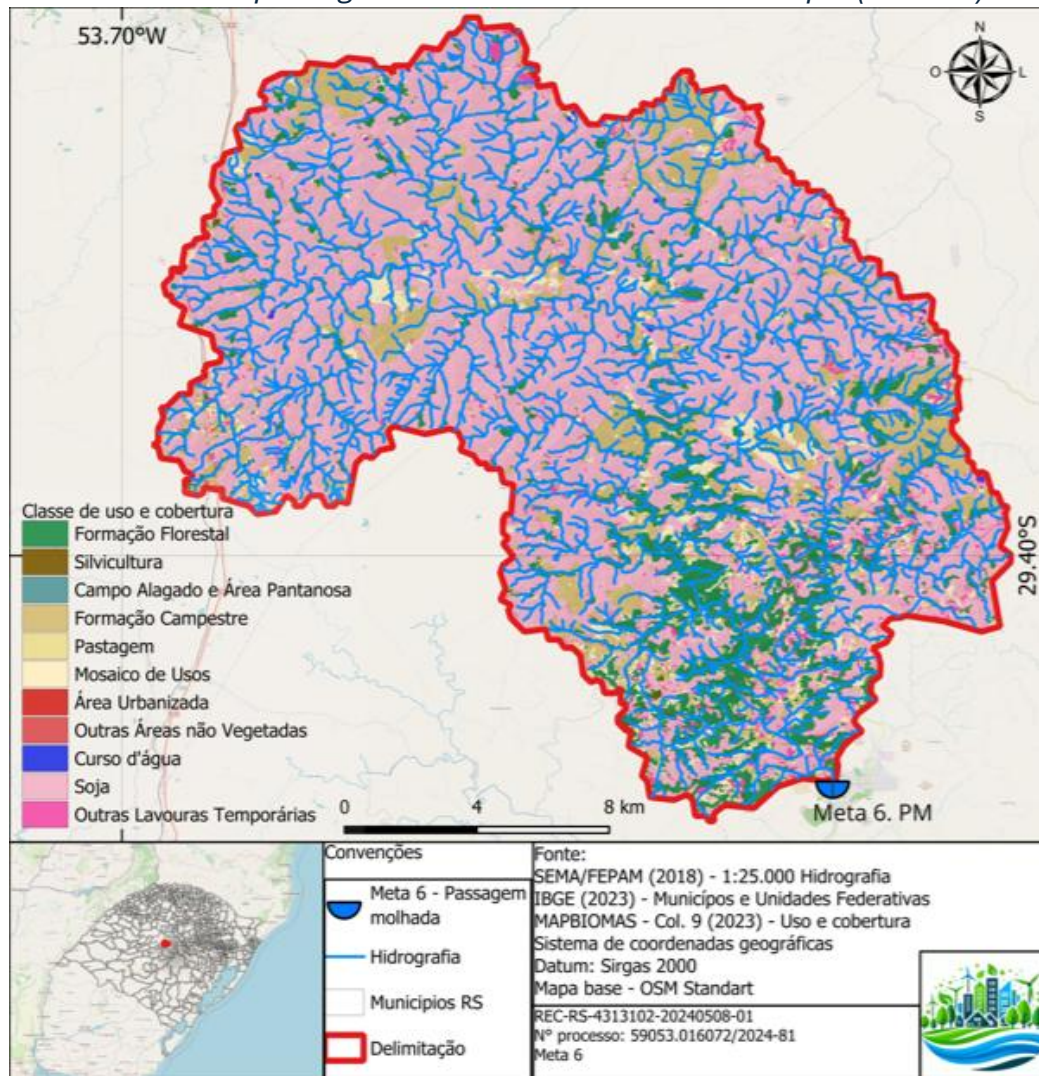
A classificação de uso e ocupação da bacia através do MapBiomass (2023) indica que na bacia hidrográfica há predomínio de usos voltados à agricultura, com o cultivo da soja nos meses de verão, e nos períodos de inverno o espaço dá lugar à cultura de trigo e pastagens, ocupando uma área que corresponde a cerca de 55,01% da área da bacia hidrográfica. Estas culturas normalmente são cultivadas no modelo de plantio direto, sem a movimentação do solo, evitando a ocorrência de erosão, contudo favorecendo o aumento do escoamento superficial em eventos extremos de precipitação. A segunda maior ocupação é pela formação florestal, com aproximadamente 18,99 % da sua área (Tabela 2), a qual inclui vegetação lenhosa com espécies arbóreas ou arbóreo-arbustivas, com predomínio de dossel contínuo. As tipologias florestais são de ombrófila, estacional decidual e semidecidual e parte das formações pioneiras. A Figura 10 ilustra a distribuição dos usos e ocupações do solo na bacia.

Tabela 2. Proporção do Uso e Ocupação do Solo na bacia hidrográfica

| Categoria                   | Porcentagem |
|-----------------------------|-------------|
| Formação Florestal          | 18.99%      |
| Formação Campestre          | 13.61%      |
| Pastagem                    | 1.23%       |
| Mosaico de Usos             | 6.33%       |
| Soja                        | 55.01%      |
| Outras Lavouras Temporárias | 4.06%       |
| Outros                      | 0.76%       |

FONTE: elaborado pelos autores com base no levantamento MapBiomass (2023).

Figura 10. Distribuição do Uso e Ocupação do Solo na bacia hidrográfica rio Soturno com exutório na passagem molhada do Balneário Municipal (Meta 06)



FONTE: elaborado pelos autores com base no levantamento MapBiomas (2023).

#### 4. METODOLOGIA

O estudo hidrológico, visando verificar e/ou determinar a cota e comprimento da passagem molhada que compõem a Dispensa de Licitação nº 243/2025, Meta 06, com Protocolo da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC): REC-RS-4313102-20240508-01 vinculado ao Processo 59053.019971/2024-36, foi realizado segundo as recomendações da IS-121 / 21 INSTRUÇÃO DE SERVIÇO PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS HIDROLÓGICOS E

PROJETOS DE DRENAGEM E DE OBRAS DE ARTE CORRENTES do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER) do Rio Grande do Sul, adaptada ao nível de anteprojeto. Dessa forma, a metodologia, inicia com a coleta de dados e termina com a estimativa das vazões, cotas, velocidades e área inundada por meio de modelagem hidrológica e hidráulica.

#### **4.1. Coleta de dados**

A modelagem hidrológica-hidráulica requer informações para uma adequada representatividade das áreas inundadas, tais como dados ou estimativas de vazões a montante do trecho ou dados de precipitação que possam ser transformados em vazão, além de dados topobatimétricos da região de estudo. Deficiências nos dados hidroclimáticos, cartográficos e topobatimétricos podem provocar problemas na representação das áreas inundadas pelo modelo hidráulico, devido à representação inadequada do fundo do canal do rio e da morfologia da região no entorno do curso d'água, dessa forma, foi dada especial atenção ao protocolo de coleta de informações necessárias.

##### *4.1.1 Dados hidrometeorológicos*

Em uma primeira etapa foi realizado um levantamento do inventário hidrometeorológico composto por postos pluviométricos, fluviométricos, estações meteorológicas entre outros elementos disponíveis para a bacia hidrográfica de contribuição e região do entorno. Esta pesquisa foi realizada junto à base de dados disponibilizada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Centro de Monitoramento e Desastres Naturais (CEMADEN), entre outros organismos.

Não há posto de monitoramento fluviométrico em operação no Rio Soturno ou próximo ao local de instalação da passagem molhada. Por outro lado, pela proximidade com a cidade de Santa Maria, foram encontradas informações pluviométricas que permitiram a montagem de uma equação de chuvas intensas de alta qualidade. Os detalhes dessa análise serão apresentados no item *4.2.1 Análise estatística dos dados hidrometeorológicos*.

#### **4.1.2 Dados topobatimétricos**

O levantamento topográfico e batimétrico da calha do rio, na área de implantação da passagem molhada, foi realizado em conformidade com as diretrizes estabelecidas na IS-121/21 (DAER/RS).

Os resultados desse trabalho estão consolidados no Relatório Técnico de Levantamento Topobatimétrico, elaborado por esta equipe e apresentado em anexo a este relatório.

#### **4.2. Processamento de Dados para Determinação de Vazão**

A estimativa da vazão e cota de projeto conforme a IS-121/21, em locais sem dados de vazão, como é o caso em análise, começa pela análise estatísticas das precipitações (ou dados existentes), na sequência é realizada a estimativa das vazões por meio de modelagem hidrológica a partir dessas precipitações e, finalmente, é feita a estimativa da cota e velocidades de projeto por meio de modelagem hidráulica. Vale destacar que, nesse documento estão ainda sendo incluídas às análises estatísticas e as recomendações feitas pelo Governo do Rio Grande do Sul para garantir a resiliência climática das estruturas. A seguir são descritas em detalhe cada uma dessas etapas.

##### **4.2.1 Análise estatística dos dados hidrometeorológicos**

O conhecimento do comportamento de eventos hidrológicos extremos máximos de um local é de suma importância para o desenvolvimento de estudos técnicos da área de engenharia, como é o caso de obras de passagens molhadas, pois garante maior confiabilidade e segurança nas obras. Uma vez que não foram encontrados dados fluviométricos no local de implantação da passagem molhada, foi realizada uma modelagem chuva-vazão, de forma que a análise estatística foi realizada sobre os dados pluviométricos, que são insumos para a modelagem hidrológica.

Assim, foi realizada a análise de frequência de máximas precipitações diárias anuais, considerando os dados pluviométricos previamente consistidos. Na IS-121/21 é indicada a utilização de postos com dados atualizados de precipitação da bacia hidrográfica, e com

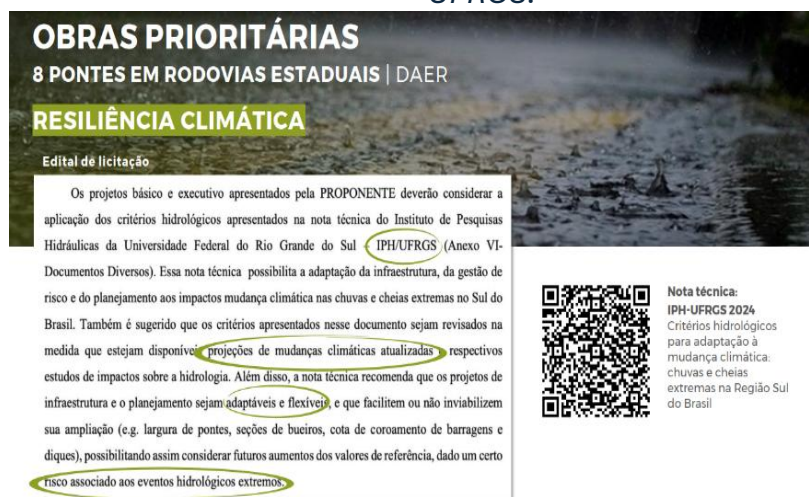
no mínimo 30 anos de dados (quando houver possibilidade). Ainda, se recomenda que sejam incluídas na análise, sempre que houver disponibilidade, as informações de precipitações associadas com as cheias de 1941, 2023 e 2024 no RS.

Os dados espacializados foram tratados estatisticamente, seguindo a instrução da IS121, visando à determinação da vazão do rio para uma precipitação com Tempo de Retorno de 100 anos para pontes. Para fins de ajustamento estatístico, foi utilizada a Lei de Distribuição de Gumbel (Probabilidade x Tempo de Retorno).

#### *4.2.3 Adequação dos critérios de projeto seguindo as recomendações feita pelo Governo do RS para garantir a resiliência climática das estruturas*

Nesse estudo, estão sendo incluídas as recomendações feitas pelo Governo do Estado do Rio Grande do Sul, na Coletiva de Imprensa realizada em 03 de junho de 2024, onde define-se que, devem ser respeitados os parâmetros hidrológicos definidos na Nota Técnica do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Nota técnica 2024 IPH-UFRGS) para garantir a resiliência climática das estruturas (Figura 11).

*Figura 11 . Recomendação do Governo do Estado para respeito da Nota Técnica 2024 IPH-UFRGS.*



**OBRAS PRIORITÁRIAS**  
**8 PONTES EM RODOVIAS ESTADUAIS | DAER**

**RESILIÊNCIA CLIMÁTICA**

**Edital de Licitação**

Os projetos básico e executivo apresentados pela PROPONENTE deverão considerar a aplicação dos critérios hidrológicos apresentados na nota técnica do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) (Anexo VI- Documentos Diversos). Essa nota técnica possibilita a adaptação da infraestrutura, da gestão de risco e do planejamento aos impactos mudança climática nas chuvas e cheias extremas no Sul do Brasil. Também é sugerido que os critérios apresentados nesse documento sejam revisados na medida que estejam disponíveis projeções de mudanças climáticas atualizadas, respectivos estudos de impactos sobre a hidrologia. Além disso, a nota técnica recomenda que os projetos de infraestrutura e o planejamento sejam adaptáveis e flexíveis, e que facilitem ou não inviabilizem sua ampliação (e.g. largura de pontes, seções de bueiros, cota de coroamento de barragens e diques), possibilitando assim considerar futuros aumentos dos valores de referência, dado um certo risco associado aos eventos hidrológicos extremos.

**Nota técnica:**  
**IPH-UFRGS 2024**  
Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil

Nesta Nota Técnica fica definido que:

Para realizar a análise estatística da série temporal de valores máximos deve ser considerada a máxima extensão temporal da série disponível na região, e devem ser incluídos os eventos extremos mais atuais e mais importantes, como os que resultaram nas cheias de **1941, 2023 e 2024 no RS**. Ainda, a nota reforça que projetos de infraestrutura ou planejamento de grande porte - para os quais são adotados, usualmente, Tempo de Retorno de 50 anos ou mais - devem ser capazes de superar a maior cheia do histórico, independentemente do período de recorrência estimado para esta cheia.

No caso de cotas e vazões, e na situação de ausência de registros sistemáticos das cheias mais importantes nos postos fluviométricos utilizados para a análise estatística, devem ser considerados registros não sistemáticos baseados em marcas de cheia. No caso de precipitações intensas e utilização de curvas intensidade-duração-frequência (IDF), deve-se utilizar a curva IDF mais atualizada na área de interesse.

Ainda, a fim de considerar projeções do impacto da mudança climática, deve-se calcular a variável de interesse considerando o critério mais restritivo entre os itens a seguir:

**Aumento da magnitude da precipitação ou da vazão:** a magnitude da precipitação intensa, ou da vazão máxima, estimada com base no histórico passado para o Tempo de Retorno pretendido no estudo/projeto deve ser aumentada pelos fatores conforme a Tabela 3.

**Aumento na frequência de eventos extremos:** O Tempo de Retorno (TR) adotado para estimar variáveis com base no histórico passado deve ser majorado em relação ao pretendido para o futuro no estudo/projeto conforme a Tabela 4 .

*Tabela 3. Percentagem de aumento da magnitude da precipitação e vazão máxima (Fonte: Nota Técnica 2024 IPH-UFRGS).*

| Tempo de Retorno de projeto | Precipitação máxima | Vazão máxima |
|-----------------------------|---------------------|--------------|
| Até 10 anos                 | 15                  | 15           |
| Maior que 10 anos           | 20                  | 20           |

*Tabela 4. Alteração no Tempo de Retorno (TR) a ser adotado devido à mudança climática para pequenas e grandes bacias (Fonte: Nota Técnica 2024 IPH-UFRGS).*

| TR de projeto<br>(anos) | TR (anos) a ser adotado em função da área<br>de drenagem da bacia (A) |                          |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------|
|                         | A < 1000 km <sup>2</sup>                                              | A > 1000 km <sup>2</sup> |
| <b>2</b>                | 3                                                                     | 3                        |
| <b>5</b>                | 12                                                                    | 10                       |
| <b>10</b>               | 25                                                                    | 20                       |
| <b>25</b>               | 75                                                                    | 60                       |
| <b>50</b>               | 200                                                                   | 150                      |
| <b>100</b>              | 450                                                                   | 350                      |
| <b>200</b>              | 1000                                                                  | 800                      |
| <b>500</b>              | 3500                                                                  | 2500                     |
| <b>1000</b>             | 8000                                                                  | 6000                     |

\*A é a área de drenagem

Assim, seguindo essas recomendações, verifica-se que a precipitação, e consequentemente a vazão de projeto deve ser determinada para um período de recorrência de 450 anos, em razão da bacia hidrográfica possuir área menor que 1000 Km<sup>2</sup>.

#### 4.3. Modelagem Hidrológica

Devido à falta de monitoramento fluviométrico no Rio Soturno, foi empregada a modelagem hidrológica de transformação chuva-vazão, com base nas recomendações da IS-121/21 para bacias com áreas maiores do que 10 km<sup>2</sup> e menores que 2500 km<sup>2</sup>. Nessas circunstâncias, a metodologia da Curva Número (CN) do Natural Resource Conservation Service (NRCS, antigo SCS) (NRCS, 2004b) é utilizada para determinação do volume de escoamento superficial, e o método do Hidrograma Unitário Triangular do NRCS (NRCS,

2007), para propagação do escoamento superficial na bacia hidrográfica. O modelo da Curva Número (CN) utiliza a equação 1 para a separação do escoamento, válida para  $P > 0,2S$ , caso contrário  $P_{ef}=0,0$ , e o valor de  $S$ , capacidade máxima de armazenamento de água no solo é estimado pela equação 2.

$$P_{ef} = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (\text{eq. 1})$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{eq. 2})$$

sendo  $P$  a precipitação em mm;  $P_{ef}$  a precipitação efetiva;  $S$  o armazenamento da água no solo em mm;  $CN$  parâmetro adimensional do método. O  $CN$  é estimado com base no tipo de solo, e características de uso e ocupação deste (Tabela 5 e Tabela 6). A estimativa dos parâmetros de simulação desse modelo foi realizada por meio do cruzamento das informações fisiográficas da bacia hidrográfica apresentada previamente, e incluem o mapa de solo, e uso e ocupação.

A chuva efetiva é propagada na forma de escoamento superficial utilizando um hidrograma unitário triangular do SCS (Figura 12). Para sua determinação são determinadas as componentes do triângulo, a partir da sequência de equações 3 a 5.

$$tm = \frac{\Delta t}{2} + 0,6.tc \quad (\text{eq. 3})$$

$$tr = 1,67. tm \quad (\text{eq. 4})$$

$$Qp = \frac{0,208.A}{tm} \quad (\text{eq.5})$$

sendo:  $\Delta t$  é o intervalo de tempo de simulação, obtido a partir da precipitação;  $tc$  é o tempo de concentração da bacia;  $Qp$  a vazão máxima do hidrograma triangular em  $m^3/s$ ;  $A$  a área

da bacia em km<sup>2</sup>. O intervalo de tempo é definido em unidades de tm, sendo recomendado

$$\Delta t = t_m/5.$$

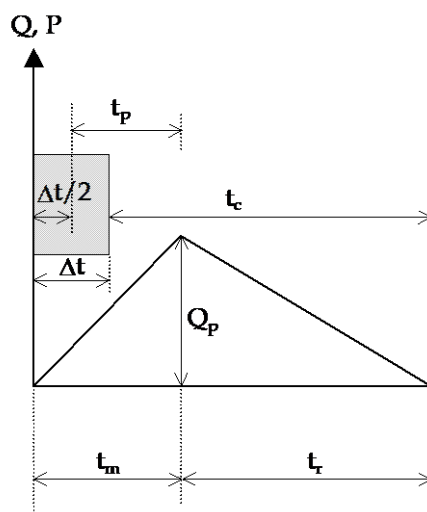
Tabela 5. Valores de CN para áreas urbanas e suburbanas.

| UTILIZAÇÃO OU COBERTURA DO SOLO                      | Grupo Hidrológico do Solo |    |    |    |
|------------------------------------------------------|---------------------------|----|----|----|
|                                                      | A                         | B  | C  | D  |
| Zonas cultivadas: sem conservação do solo            | 72                        | 81 | 88 | 91 |
| com conservação do solo                              | 62                        | 71 | 78 | 81 |
| Pastagens ou terrenos em más condições               | 68                        | 79 | 86 | 89 |
| Baldios em boas condições                            | 39                        | 61 | 74 | 80 |
| Prado em boas condições                              | 30                        | 58 | 71 | 78 |
| Bosques ou zonas florestais: cobertura ruim          | 45                        | 66 | 77 | 83 |
| cobertura boa                                        | 25                        | 55 | 70 | 77 |
| Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, |                           |    |    |    |
| com relva em mais de 75% da área                     | 39                        | 61 | 74 | 80 |
| com relva de 50 a 75% da área                        | 49                        | 69 | 79 | 84 |
| Zonas comerciais e de escritórios                    | 89                        | 92 | 94 | 95 |
| Zonas industriais                                    | 81                        | 88 | 91 | 93 |
| Zonas residenciais                                   |                           |    |    |    |
| lotes de (m2)      % média impermeável               |                           |    |    |    |
| <500                      65                         | 77                        | 85 | 90 | 92 |
| 1000                      38                         | 61                        | 75 | 83 | 87 |
| 1300                      30                         | 57                        | 72 | 81 | 86 |
| 2000                      25                         | 54                        | 70 | 80 | 85 |
| 4000                      20                         | 51                        | 68 | 79 | 84 |
| Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.  | 98                        | 98 | 98 | 98 |
| Arruamentos e estradas:                              |                           |    |    |    |
| asfaltadas e com drenagem de águas pluviais          | 98                        | 98 | 98 | 98 |
| paralelepípedos                                      | 76                        | 85 | 89 | 91 |
| Terra                                                | 72                        | 82 | 87 | 89 |

Tabela 6. Valores de CN para áreas rurais.

| UTILIZAÇÃO<br>COBERTURA DO SOLO           | OU | MANEJO DA SUPERFÍCIE        | Grupo Hidrológico do Solo |    |    |    |
|-------------------------------------------|----|-----------------------------|---------------------------|----|----|----|
|                                           |    |                             | A                         | B  | C  | D  |
| Solo lavrado                              |    | com sulcos retilíneos       | 77                        | 86 | 91 | 94 |
|                                           |    | em fileiras retas           | 70                        | 80 | 87 | 90 |
| Plantações<br>regulares                   |    | em curvas de nível          | 67                        | 77 | 83 | 87 |
|                                           |    | terraceado em nível         | 64                        | 76 | 84 | 88 |
|                                           |    | em fileiras retas           | 64                        | 76 | 84 | 88 |
| Plantações de<br>cereais                  |    | em curvas de nível          | 62                        | 74 | 82 | 85 |
|                                           |    | terraceado em nível         | 60                        | 71 | 79 | 82 |
|                                           |    | em fileiras retas           | 62                        | 75 | 83 | 87 |
| Plantações de<br>legumes ou<br>cultivados |    | em curvas de nível          | 60                        | 72 | 81 | 84 |
|                                           |    | terraceado em nível         | 57                        | 70 | 78 | 89 |
|                                           |    | Pobres                      | 68                        | 79 | 86 | 89 |
|                                           |    | Normais                     | 49                        | 69 | 79 | 94 |
|                                           |    | Boas                        | 39                        | 61 | 74 | 80 |
| Pastagens                                 |    | pobre, em curvas de nível   | 47                        | 67 | 81 | 88 |
|                                           |    | normal, em curvas de nível  | 25                        | 59 | 75 | 83 |
|                                           |    | boa, em curvas de nível     | 6                         | 35 | 70 | 79 |
| Prado                                     |    | Normal                      | 30                        | 58 | 71 | 78 |
| Bosque                                    |    | esparso, baixa transpiração | 45                        | 66 | 77 | 83 |
|                                           |    | normal                      | 36                        | 60 | 73 | 79 |
|                                           |    | denso, alta transpiração    | 25                        | 55 | 70 | 77 |
| Chácaras                                  |    | Normais                     | 56                        | 75 | 86 | 91 |
| Estradas de<br>terra                      |    | má conservação              | 72                        | 82 | 87 | 89 |
|                                           |    | Compactada                  | 74                        | 84 | 90 | 92 |
| Florestas                                 |    | esparsa, baixa transpiração | 56                        | 75 | 86 | 91 |
|                                           |    | esparsa,                    | 46                        | 68 | 78 | 84 |
|                                           |    | densas, alta transpiração   | 26                        | 52 | 62 | 69 |
|                                           |    | normal                      | 36                        | 60 | 70 | 76 |

Figura 12. Hidrograma unitário triangular do SCS.



O hidrograma resultante da chuva efetiva é obtido a partir da equação de convolução discreta (equações 6 e 7).

$$Q_t = \sum_{i=1}^t Pef_i h_{t-i+1} \quad \text{para } t < k \dots\dots\dots (\text{eq.6})$$

$$Q_t = \sum_{i=t-k+1}^t Pef_i h_{t-i+1} \quad \text{para } t \geq k \dots\dots\dots (\text{eq.7})$$

sendo  $Q_t$  a vazão de saída da bacia ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $H$  o número de ordenadas do hidrograma unitário ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}$ );  $Pef$  são os valores de precipitação efetiva no intervalo de tempo ( $\text{mm}$ );  $K$  o número de ordenadas do hidrograma unitário, que pode ser obtido por  $k = n - m + 1$ , onde  $m$  é o número de valores de precipitação e  $n$  é o número de valores de vazões do hidrograma.

Ainda, ao final da modelagem, caso a vazão de projeto produza uma cheia inferior à maior registrada no local, esta última deve ser adotada para dar sequência à análise hidráulica, conforme a Nota Técnica 2024 do IPH-UFRGS.

Para a modelagem hidrológica do sistema, utilizou-se o software HEC-HMS, desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (USA). O software foi escolhido por sua versatilidade e capacidade de integrar diferentes métodos hidrológicos, incluindo o método do Número da Curva (CN) para infiltração e a Unidade Hidrográfica de Tempo (HUT) para transformação do fluxo, ambos utilizados neste projeto.

#### **4.4. Modelagem Hidráulica**

A partir das vazões máximas estimadas na modelagem hidrológica, foi realizada a modelagem hidráulica do escoamento em regime permanente, considerando a vazão máxima. Na modelagem é utilizada a representação das seções topobatimétricas, permitindo determinar, desta forma, as cotas atingidas pela água para o Tempo de Retorno em análise.

Vale destacar que a IS-121/21 exige somente a verificação e o dimensionamento hidráulico com a aplicação da equação da Continuidade associada à Fórmula de Manning. No entanto, nesse trabalho foi empregada modelagem hidrodinâmica, com emprego das equações completas de Saint-Venant. Como ferramenta para o processo foi empregado o HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System), mundialmente utilizado neste tipo de estudo.

Tanto a equação de Manning quanto a modelagem hidrodinâmica conduzida em regime permanente são estacionários, pois as propriedades do fluido, como velocidade e pressão, permanecem constantes em um determinado ponto ao longo do tempo. A principal diferença é que, ao empregar a equação de Manning, o escoamento é também uniforme, ou seja, todos os pontos ao longo de uma trajetória específica que seguem as partículas do fluido apresentam a mesma velocidade. Embora a velocidade possa variar entre diferentes trajetórias, dentro de uma mesma trajetória, não há variação na velocidade ao longo do tempo. Esse tipo de escoamento é observado em sistemas nos quais não há acelerações ou desacelerações significativas do fluido ao longo do tempo, o que pode ser bastante

simplista na reprodução de sistemas naturais como rios. Já a modelagem hidrodinâmica em regime permanente permite representar a variabilidade da velocidade do fluído ao longo da trajetória num intervalo de tempo. Portanto, a modelagem hidrodinâmica permite avaliar condições adicionais que poderiam afetar a estrutura da passagem molhada, como o eventual efeito de represamento provocado pela passagem molhada, por exemplo.

As informações necessárias para a modelagem hidráulica incluem as seções topobatimétricas, topografia da planície de inundação, além da vazão de projeto. O processo de obtenção de todas estas informações foi apresentado no relatório de levantamento topobatimétrico, incluindo seções, topografia e o levantamento de seções realizados por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT).

Parâmetros hidráulicos necessários ao processo de modelagem foram ajustados de acordo com as características de calha e planície de inundação do local, que foram determinadas a partir de visitas técnicas realizadas durante o decorrer deste estudo, e consulta a bibliografia especializada. Para o ajustamento do modelo (calibração) foi visada a reprodução da zona inundada, delimitada durante o levantamento topobatimétrico, objetivando uma boa reprodutibilidade das vazões para eventos extremos. O resultado da simulação hidráulica é apresentado na forma de mapas e gráficos (cota x velocidade e cota x vazão).

## 5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA PRECIPITAÇÃO E VAZÃO

### 5.1 Estatísticas dos dados pluviométricos

Foram identificadas 3 estações pluviométricas na região com disponibilidade de dados adequados e confiáveis para obtenção de informações. Na Tabela 7, encontra-se um resumo das principais características dos postos utilizados nesse estudo, incluindo localização e operador.

*Tabela 7. Informações dos postos pluviométricos utilizados na análise*

| <b>Código</b> | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Operador</b> | <b>Nome da estação</b> |
|---------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------------|
| 2953017       | -29.724         | -53.720          | INMET           | SANTA MARIA            |
| A803          | -29.725         | -53.721          | INMET           | SANTA MARIA            |
| 83936         | -29.725         | -53.721          | INMET           | SANTA MARIA            |

Na IS-121/21 é indicada a utilização de estações com dados atualizados de precipitação na bacia hidrográfica, e com no mínimo 30 anos de dados, quando houver disponibilidade. Dessa forma, foram utilizados registros da estação 2953017, localizada no centro da cidade de Santa Maria, tendo em vista a disponibilidade de dados diários de 1939 a 2011. A fim de obter uma série contínua e atualizada, foram utilizados também os dados diários de precipitação obtidos a partir dos dados horários da estação A803, localizada no mesmo município. Portanto, foi gerada uma série mais extensa e com informações associadas às cheias de 1941, 2023 e 2024 no RS.

A série gerada possui índice de falhas inferior a 10% entre 1939 a 2024, as quais foram preenchidas com informações das estações 83936 e 2954001, tendo em vista os altos valores de correlação da série obtida (por simplicidade simplesmente série 2953017/A803 de SM) com a série de dados da estação 839336 (Figura 13) e 2954001 (Figura 14), que mostram a análise de dupla massa.

Figura 13. Análise de dupla massa entre a série SM obtida nas estações 2953017/A803 e na estação 83936.

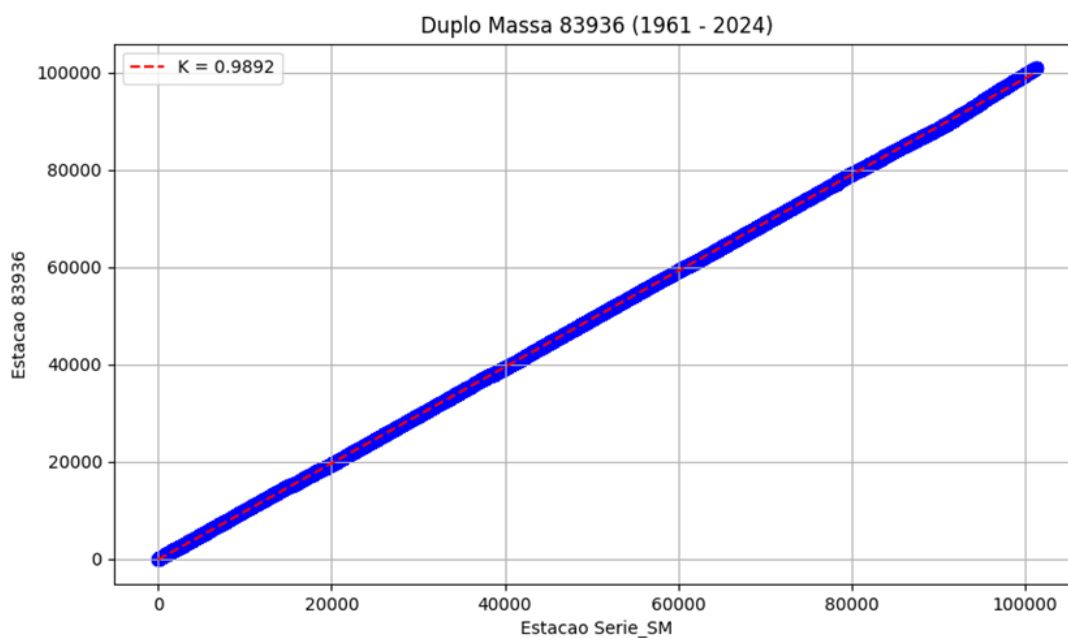
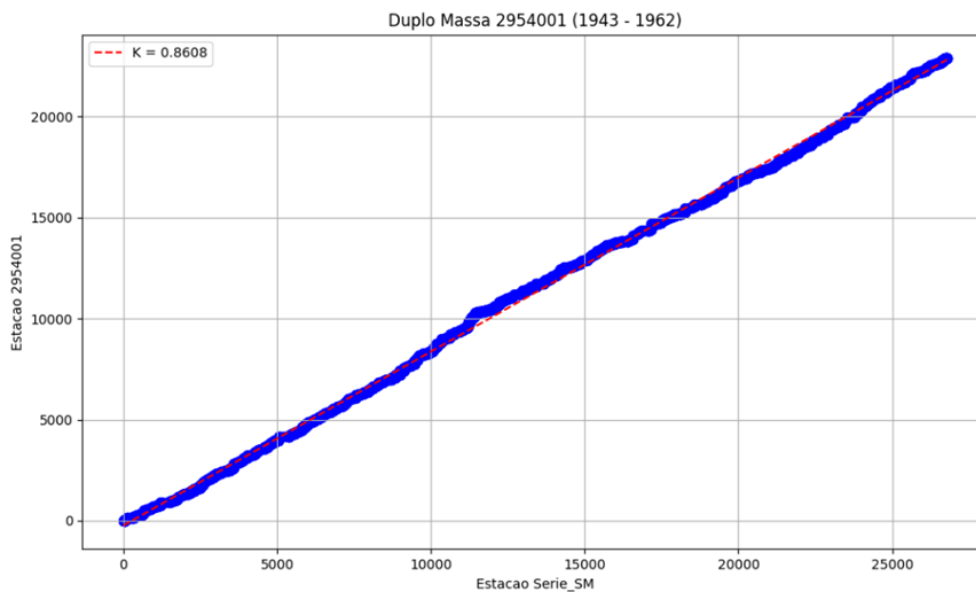


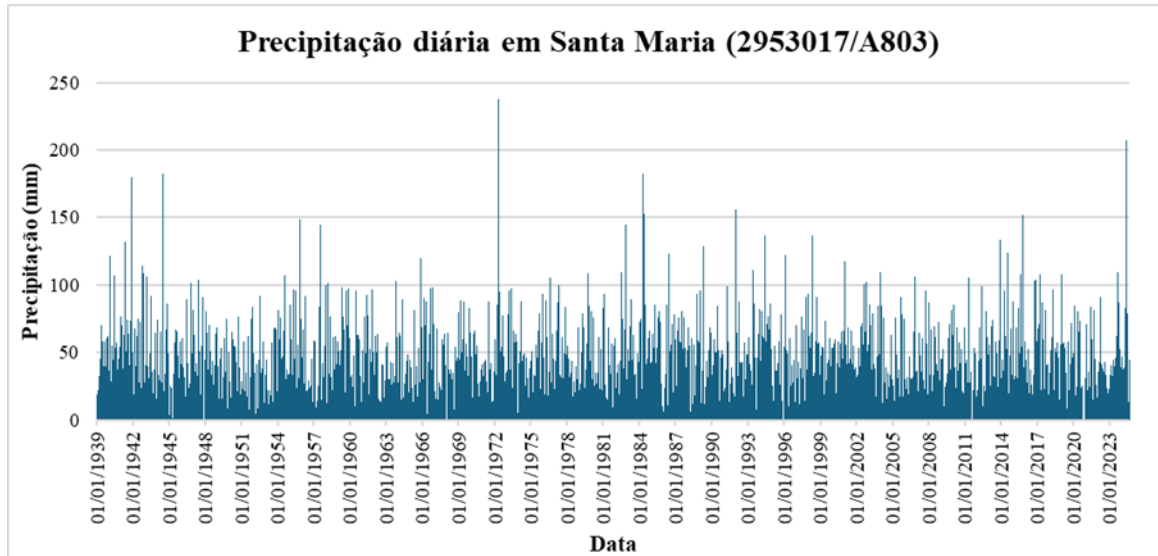
Figura 14. Análise de Dupla Massa entre a série SM obtida nas estações 2953017/A803 e a estação 2954001.



A série de precipitação utilizada nesse estudo após o preenchimento das falhas é apresentada na Figura 15. Destaca-se que o valor máximo de chuva diária foi de 238 mm,

registrado no ano de 1972. Embora esse valor tenha superado os registros de 1941, 2023 e 2024, não foram registrados estragos significativos associados a ele; ao contrário, dentre dos eventos mencionados, o volume de chuva acumulado em um período superior a um dia não foi significativo, o que pode ter contribuído para a menor gravidade do evento.

*Figura 15. Série de precipitação diária obtida para a área de estudo.*

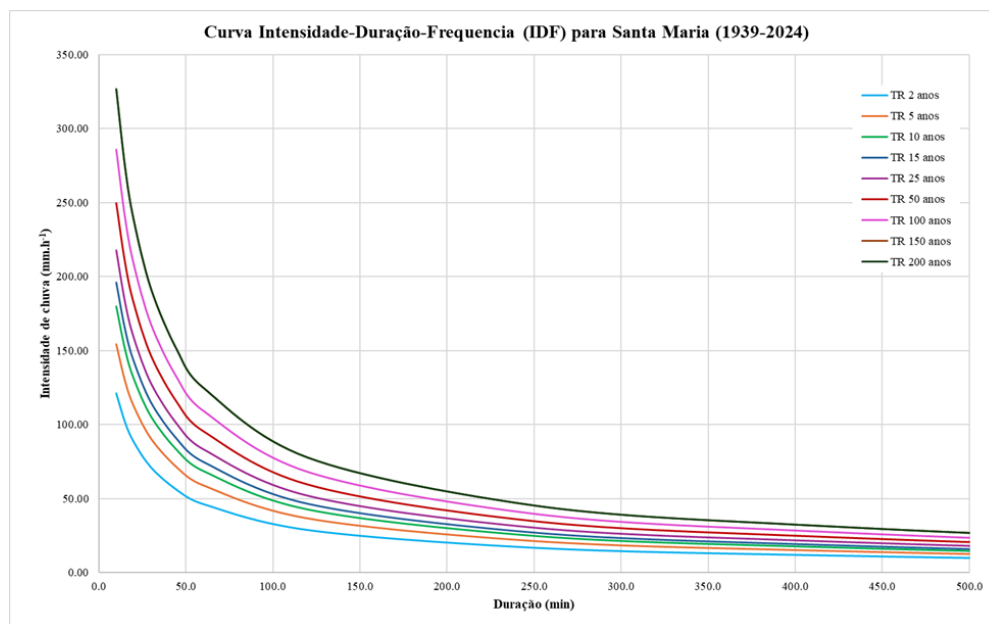


No caso de precipitações intensas e utilização de curvas intensidade-duração-frequência (IDF), deve-se utilizar a curva IDF mais atualizada na área de interesse. Logo, a partir da análise de frequência das máximas precipitações diárias anuais propõe-se uma atualização da curva IDF elaborada por Roman (2015) para a cidade de Santa Maria, que inclui os eventos extremos de 1941, 2023 e 2024. As séries de máxima precipitações com duração entre 24h e 60 dias foram ajustadas à distribuição estatística Geral de Valores Extremos (GEV) para tempos de retorno (TR) de 2, 5, 10, 15, 25, 50 100, 150, 200 e 450 anos. Para obtenção de valores de precipitação sub-diárias, foram utilizados os coeficientes de desagregação sugeridos por Basso et al. (2016) e Roman (2015). A curva IDF atualizada para Santa Maria foi estabelecida conforme a Equação 7 e Figura 16.

$$I = \frac{1096,642 \cdot TR^{0,201}}{(t+9,778)^{0,764}} \quad (\text{eq. 7})$$

Sendo:  $I$  a intensidade da precipitação em  $\text{mm.h}^{-1}$ ,  $TR$  o tempo de retorno da precipitação em anos e  $t$  a duração da precipitação em minutos.

*Figura 16. Curva IDF atualizada para a cidade de Santa Maria.*



Quando analisados os máximos valores de precipitação observada para as durações de 24h, 48h, 72h e 96h durante o evento de abril e maio de 2024, observa-se uma grande redução no tempo de recorrência das precipitações, de acordo com a curva IDF atualizada, em comparação com a proposta por Roman (2015) (Tabela 8). Isso reforça a importância da IDF atualizada neste trabalho, e destaca-se que a utilização de equações IDFs para a cidade de Santa Maria que não incorporem o evento de abril e maio de 2024, podem levar a erros críticos no dimensionamento da estrutura.

*Tabela 8. Tempos de retorno de precipitações com diferentes durações ocorridas no evento de abril e maio de 2024.*

| Precipitação<br>(mm) | Duração<br>(horas) | I (mm.h <sup>-1</sup> ) | TR (anos)<br>IDF Roman<br>(2015) | TR (anos)<br>IDF Deste<br>estudo |
|----------------------|--------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 207 ,00              | 24 ,00             | 8 ,63                   | 60 ,13                           | 34 ,55                           |
| 353 ,00              | 48 ,00             | 7 ,35                   | 487 ,34                          | 213 ,64                          |
| 412 ,40              | 72 ,00             | 5 ,73                   | 636 ,64                          | 287 ,51                          |
| 450 ,40              | 96 ,00             | 4 ,69                   | 672 ,29                          | 315 ,89                          |

A partir da IDF atualizada, a precipitação de projeto com 24 horas de duração foi estimada em 256,4 mm que, conforme pode ser acompanhado na Tabela 8 é superior à precipitação de 24 horas observada durante o evento de abril e maio de 2024. Isso indica que, o evento de abril e maio de 2024 foi consequência de precipitações que têm tempo de retorno inferior ao de projeto da passagem molhada, para precipitações com durações menores que 24 horas. No entanto, o volume acumulado de precipitação ao longo dos dias resultou em volumes extremamente elevados, e acima do utilizado para projetos de passagens molhadas, conforme pode ser observado ainda na Tabela 8.

Essa discussão apenas apresenta a importância da utilização de IDF atualizada, uma vez que a precipitação de projeto foi determinada em razão das características da bacia hidrográfica contribuinte à região da passagem molhada em estudo, e em consonância com os métodos HUT e CN do NCRS, que utilizam o parâmetro o tempo de concentração para esta definição.

## **5.2 Determinação da precipitação de projeto conforme recomendações feita pelo Governo do RS para garantir a resiliência climática das infraestruturas.**

Conforme indicado na metodologia, estão sendo incluídas as recomendações feitas pelo Governo do Estado do Rio Grande do Sul, na Coletiva de Imprensa realizada em 03 de junho de 2024, onde define-se que, devem ser respeitados os parâmetros hidrológicos definidos na Nota Técnica do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio

Grande do Sul (Nota técnica 2024 IPH-UFRGS) para garantir a resiliência climática das estruturas.

Conforme a nota técnica, o projeto da passagem molhada deve considerar **a maior cheia do histórico**, independentemente do Tempo de Retorno estimado para esta cheia. No entanto, a própria Nota técnica 2024 IPH-UFRGS, indica a necessidade de majorar a precipitação, e para áreas de bacia menores que 1000 km<sup>2</sup>, **utilizar para o projeto o TR de 450 anos**.

## 6. DETERMINAÇÃO DE VAZÃO DE PROJETO

Conforme descrito na metodologia, a IS-121/21 recomenda a utilização da metodologia da Curva Número (CN) do Natural Resources Conservation Service (NRCS, antigo SCS) (NRCS, 2004b) para determinação do volume de escoamento superficial, e o método do Hidrograma Unitário Triangular do NRCS (NRCS, 2007) para a propagação do escoamento na bacia hidrográfica. Para aplicação desses métodos, é necessário estimar previamente dois parâmetros principais, entre outros elementos, que incluem: o tempo de concentração da bacia e o parâmetro CN.

### 6.1 Estimativa do tempo de concentração

Conforme Brasil (2005), a avaliação do tempo de concentração de uma bacia hidrográfica é bastante complexa, devido aos inúmeros condicionantes envolvidos. Há uma grande variedade de expressões para seu cálculo, o que exige atenção especial na sua determinação, pois esse parâmetro influencia significativamente o resultado da vazão de projeto. De modo geral, para uma mesma bacia hidrográfica, a vazão máxima calculada é inversamente proporcional ao tempo de concentração adotado.

A IS-121/21 indica, de forma simplificada, que o tempo de concentração deve ser estimado pela fórmula do antigo DNOS. Para bacias muito grandes, nas quais o tempo de concentração excede 24 horas, recomenda-se o uso da metodologia de Otto Pfafstetter. No

entanto, as instruções do DNIT (Brasil, 2005; 2006) apresentam uma análise mais detalhada, sugerindo que se dê preferência a fórmulas que conduzam a valores realistas tanto para bacias pequenas quanto para médias e grandes. Nesse documento, é indicado que sejam avaliadas as equações de Kirpich, DNOS, Kirpich Modificada, George Ribeiro, Pasini e Ventura.

Em particular, com base em resultados obtidos em análise de mais de 200 bacias estudadas pelo DNER, a equação de Kirpich Modificada é apontada como uma das mais promissoras. Assim, neste estudo, o tempo de concentração foi determinado pela equação do DNOS (equação 8) e pela equação de Kirpich modificado (equação 9).

$$tc = \frac{10}{k} \cdot \frac{A^{0,3} \cdot L^{0,2}}{I^{0,4}} \quad (\text{eq. 8})$$

Sendo: tc o tempo de concentração (min), A a área da bacia hidrográfica (ha), L o comprimento do curso d'água (m), I a declividade (%), e o valor de k depende das características da bacia, conforme:

- Terreno areno-argiloso, coberto de vegetação intensa, elevada absorção => K=2,0
- Terreno comum, coberto de vegetação, absorção apreciável => K=3,0
- Terreno argiloso, coberto de vegetação, absorção média => K=4,0
- Terreno argiloso de vegetação média, pouca absorção => K=4,5
- Terreno com rocha, escassa vegetação, baixa absorção => K=5,0
- Terreno rochoso, vegetação rala, reduzida absorção => K=5,5

$$tc = 1,42 \cdot \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385} \quad (\text{eq. 9})$$

Sendo TC o tempo de concentração, em horas; L o comprimento do curso d'água, em km; e H = desnível máximo, em m.

Para a bacia hidrográfica do rio Soturno, até a passagem molhada (Meta 06), com área de 405,24 km<sup>2</sup> e comprimento de drenagem de 72,94 km, foi adotado o coeficiente K = 3, considerando as características da bacia. Pela equação do DNOS, obteve-se um tempo de concentração de 15,7 horas. Já pela equação de Kirpich Modificada, considerando um

desnível altimétrico de 419,10 m e o mesmo comprimento de drenagem, resultou um tempo de concentração de 15,9 horas (aproximadamente 952,7 minutos). Ambos os métodos apresentaram resultados bastante próximos, reforçando a confiabilidade dessa estimativa. Para prosseguimento do estudo, foi adotada uma duração de 960 minutos como referência para a determinação da chuva de projeto, valor ligeiramente superior ao tempo de concentração estimado, evitando assim a redução da intensidade da chuva devido à consideração de durações excessivamente longas, conforme orienta a IPR-715 do DNIT (Brasil, 2005).

## 6.2 Hietograma de projeto

As precipitações de projeto, determinadas a partir de relações Intensidade–Duração–Frequência (IDF), em função de seu caráter sintético, necessitam de um tratamento adicional para reproduzir, de forma aproximada, a aleatoriedade da distribuição dos volumes de precipitação ao longo do evento. Na natureza, essa distribuição temporal pode apresentar padrões pouco definidos, o que dificulta sua representação direta. Por essa razão, empregam-se métodos sintéticos de distribuição temporal, capazes de fornecer uma representação simplificada e operacional.

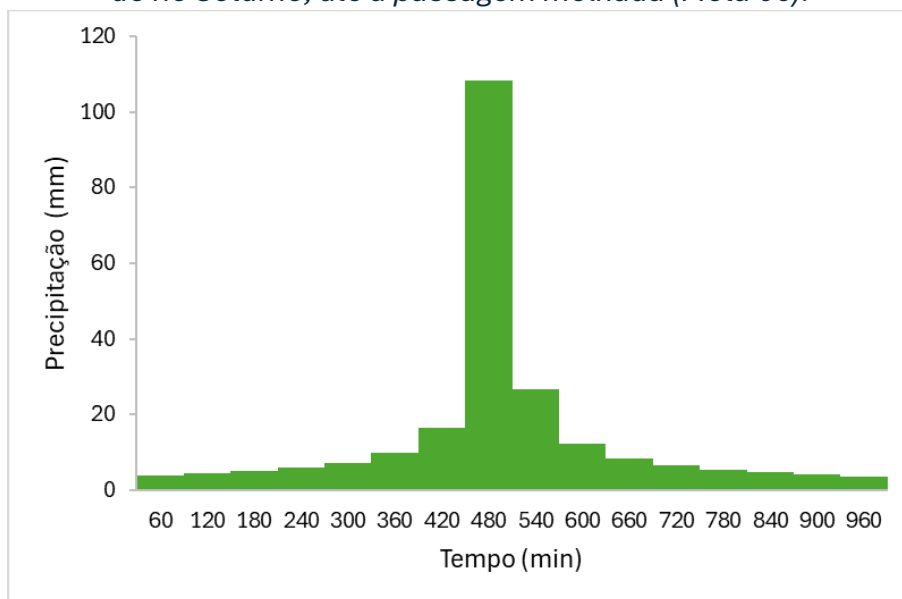
Entre os métodos mais consagrados, destacam-se aqueles que atribuem uma distribuição temporal arbitrária à chuva de projeto, como o Método dos Blocos Alternados (MBA). Este método possibilita a construção de um hietograma de projeto a partir da relação IDF e é amplamente utilizado em estudos de drenagem.

Neste estudo, adotou-se o MBA com os seguintes critérios:

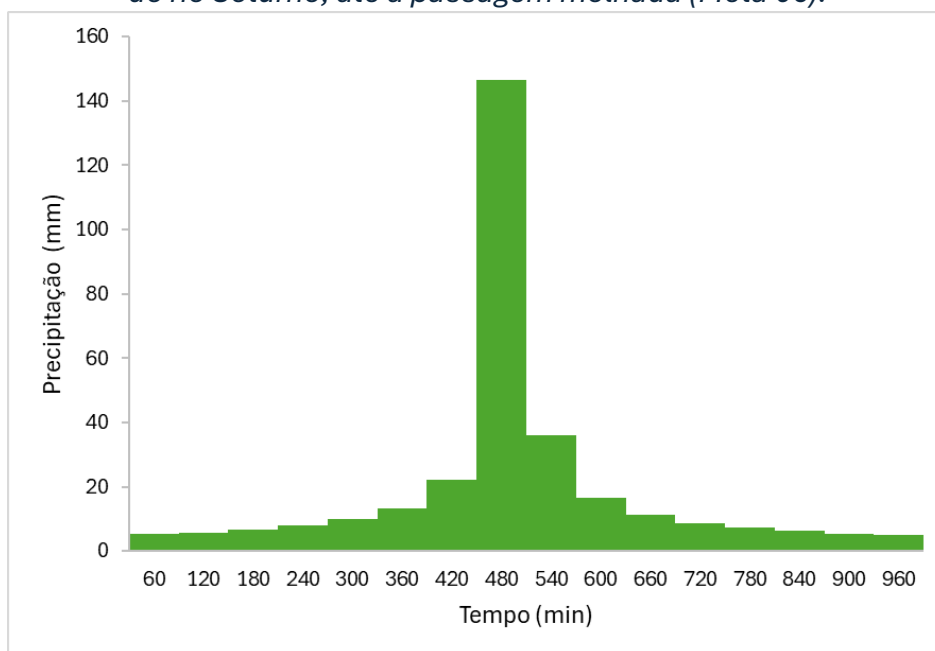
- Discretização temporal: 60 minutos, compatível com a menor duração das IDF disponíveis;
- Posição do pico de precipitação: no ponto central da duração total da chuva;
- Ordenamento: o segundo maior bloco de precipitação posicionado à direita do pico;
- Duração total: 1020 minutos, igual ao tempo de concentração da bacia hidrográfica, conforme definido no item anterior.

Foram avaliados tempos de retorno de 100 anos e 450 anos, para os quais foram determinados os hietogramas apresentados na Figura 17 (TR=100anos) e Figura 18 (TR=450anos).

*Figura 17 Hietograma de projeto para 100 anos de tempo de retorno na bacia hidrográfica do rio Soturno, até a passagem molhada (Meta 06).*



*Figura 18 Hietograma de projeto para 450 anos de tempo de retorno na bacia hidrográfica do rio Soturno, até a passagem molhada (Meta 06).*



### 6.3 Ajuste do modelo hidrológico

A etapa inicial da modelagem hidrológica consistiu no ajuste dos parâmetros que melhor representassem o comportamento das vazões no rio Soturno, junto à passagem molhada da Meta 06, conforme descrito a seguir.

Considerando a disponibilidade de dados referentes à altura máxima de água registrada durante a enchente ocorrida entre abril e maio de 2024, foi conduzido um processo iterativo de calibração entre o modelo hidrológico (HEC-HMS) e o modelo hidráulico (HEC-RAS), este último empregado na determinação das cotas e velocidades de projeto. Após o ajuste, o modelo hidrológico foi utilizado para estimar as vazões de projeto, as quais, posteriormente, foram propagadas no modelo hidráulico para a definição final das cotas e velocidades. Estas etapas são descritas na sequência.

#### 6.3.1 Evento de calibração

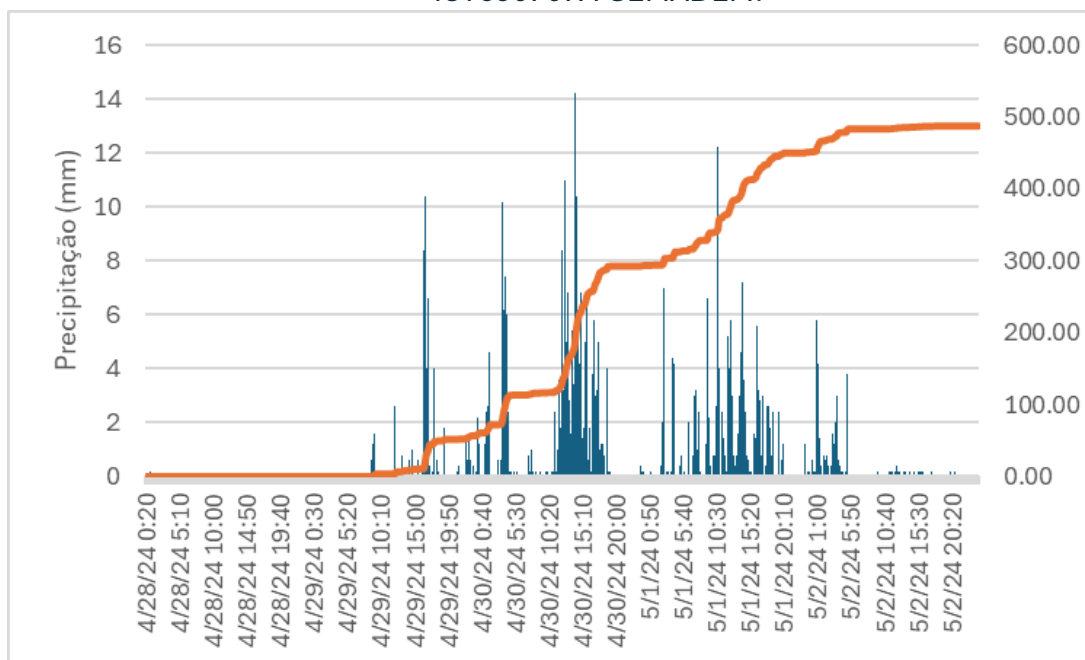
A calibração dos modelos hidrológico (HEC-HMS) e hidráulico (HEC-RAS) foi realizada com base no evento de cheia registrado entre abril e maio de 2024. Para este evento, foi possível mensurar a cota máxima atingida pela lâmina d'água e delimitar a área afetada pela inundação.

A precipitação observada foi obtida na estação pluviométrica 431690707A do CEMADEM. O hietograma correspondente ao evento — contendo a chuva horária parcial (linha azul) e a chuva acumulada total (linha laranja) — é apresentado na Figura 19.

Para a calibração dos modelos, o hietograma do evento foi inserido no *HEC-HMS* para a simulação da vazão resultante, considerando os parâmetros hidrológicos de referência previamente determinados. A vazão simulada foi então transferida para o *HEC-RAS* nas seções correspondentes, onde se realizou a modelagem hidráulica do trecho da passagem molhada. O ajuste dos modelos teve como objetivo representar de forma mais fiel possível a dinâmica do escoamento. Para isso, parâmetros como o Número de Curva (CN) e o Coeficiente de Rugosidade de Manning foram calibrados de maneira iterativa — realizando-se simulações hidrológicas seguidas de simulações hidráulicas — até a convergência para

valores considerados adequados e compatíveis com a literatura e as características da bacia, mantendo-se o tempo de concentração fixo, conforme previamente determinado. O processo de calibração foi conduzido manualmente, adotando como variável de controle a melhor correspondência possível, no *HEC-RAS*, entre a mancha de inundação observada no evento de cheia e a mancha obtida nas simulações. Como resultado, obteve-se uma boa concordância entre a mancha simulada e aquela observada em campo, tanto em extensão quanto em cota máxima atingida. As diferenças pontuais ficaram dentro dos limites considerados aceitáveis para estudos hidrológico-hidráulicos dessa natureza, conferindo ao modelo um nível de confiabilidade adequado para a simulação de cenários de projeto. Assim, os parâmetros ajustados foram adotados nas etapas subsequentes de modelagem, garantindo maior robustez às estimativas de vazão, cotas e velocidades associadas aos diferentes tempos de retorno analisados.

*Figura 19. Hietograma da chuva e chuva acumulada no evento de abril-maio 2024. Estação 431690707A CEMADEM.*

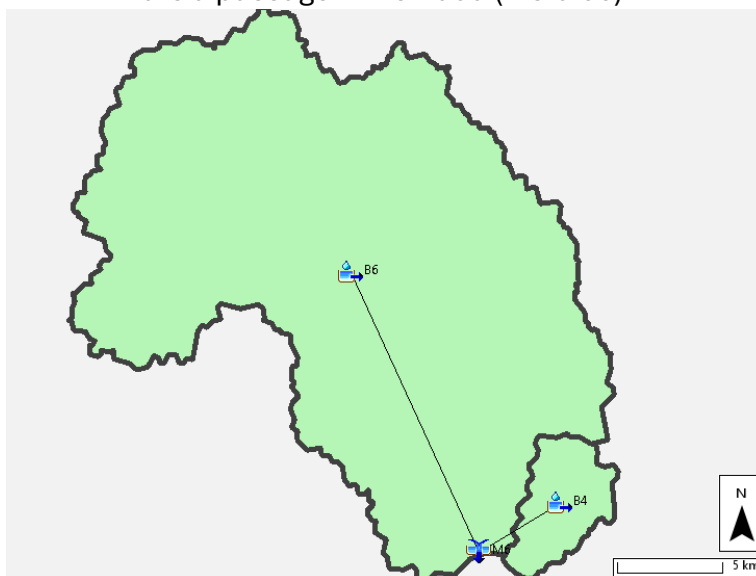


### 6.3.2 Topologia de simulação

A Figura 20 representa a topologia de simulação da bacia hidrográfica do rio Soturno, no modelo HEC-HMS, com destaque para a bacia até o local da passagem molhada (Meta 06). Ressalta-se que, embora a passagem molhada esteja situada sobre o rio Soturno, aproximadamente 200 metros a jusante da localização desta, ocorre a confluência do arroio Portela ao rio Soturno. Para eventos de grandes hidrológicos de grande abrangência de precipitações, como o ocorrido em Abril-Maio de 2024, a produção de escoamento nas duas bacias hidrográficas pode ocorrer de forma simultânea, aumentando os picos de vazões na região. Dessa forma, as análises consideraram os efeitos das contribuições independentes das duas sub-bacias de montante durante as simulações - Soturno e do Portela - na simulação.

A delimitação das sub-bacias considerou a topografia, os cursos d'água existentes e a localização da passagem molhada a ser analisada, de modo a viabilizar a etapa subsequente de modelagem hidrodinâmica. Os resultados de vazão obtidos no HEC-HMS foram exportados e utilizados como condição de contorno de montante no modelo HEC-RAS.

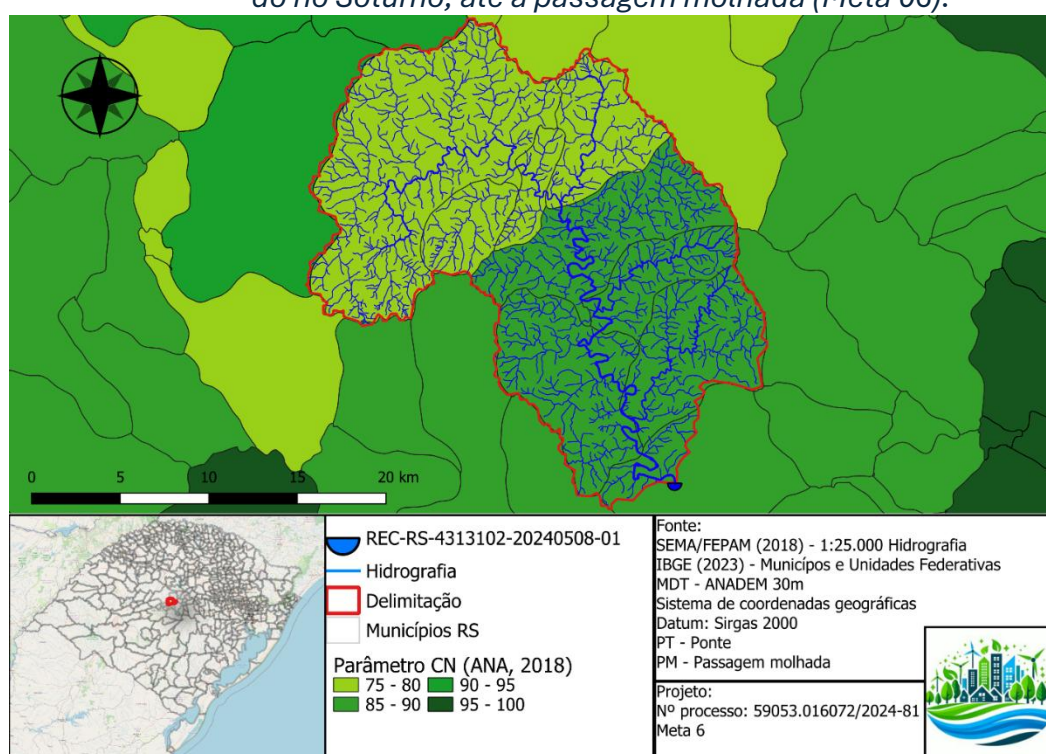
Figura 20. Esquema topológico de representação no HEC-HMS da bacia do rio Soturno, até a passagem molhada (Meta 06).



### 6.3.3 Calibração do parâmetro CN

O valor de referência do Número de Curva (CN) para a bacia hidrográfica foi obtido a partir do produto BHO\_CN\_2018, descrito na Nota Técnica nº 46/2018/SPR da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Esse produto contém parâmetros CN espacializados para a Base Hidrográfica Ottocodificada de 2014 (Figura 21) e baseia-se no mapa de uso e ocupação do solo do Brasil para o ano de 2014, conforme estimativas do IBGE (ANA, 2018). O valor reflete uma condição mediana de umidade inicial.

*Figura 21. Mapa do parâmetro CN para o cenário atual de uso e ocupação do solo na bacia do rio Soturno, até a passagem molhada (Meta 06).*

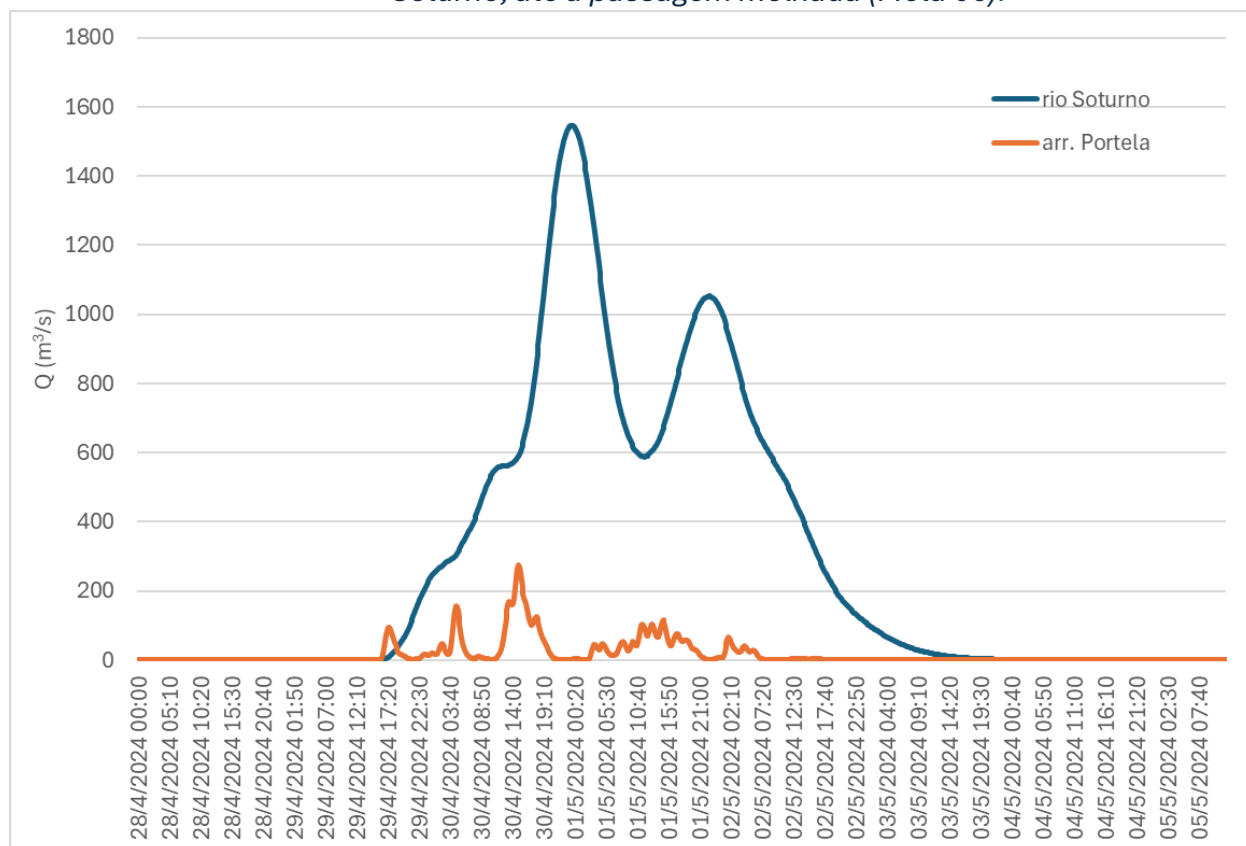


Fonte: Elaboração própria com base na Nota Técnica nº 46/2018/SPR/ANA.

Durante o processo de calibração, obteve-se um valor de CN de 90, correspondente à condição de solo saturado (condição III, segundo o NRCS). Esse resultado se justifica devido às características do evento de cheia utilizado na calibração, que foi precedido por elevados volumes de precipitação nos dias anteriores. Os valores de rugosidade ajustados para o modelo hidráulico estão apresentados no item 7.1 Ajuste do Modelo Hidráulico.

O hidrograma resultante para o modelo calibrado na passagem molhada do rio Soturno, Meta 06 é apresentado na Figura 22 para a cheia de Abril-Maio de 2024.

*Figura 22. Hidrograma da inundação do abril-maio de 2024 da Bacia Hidrográfica do rio Soturno, até a passagem molhada (Meta 06).*



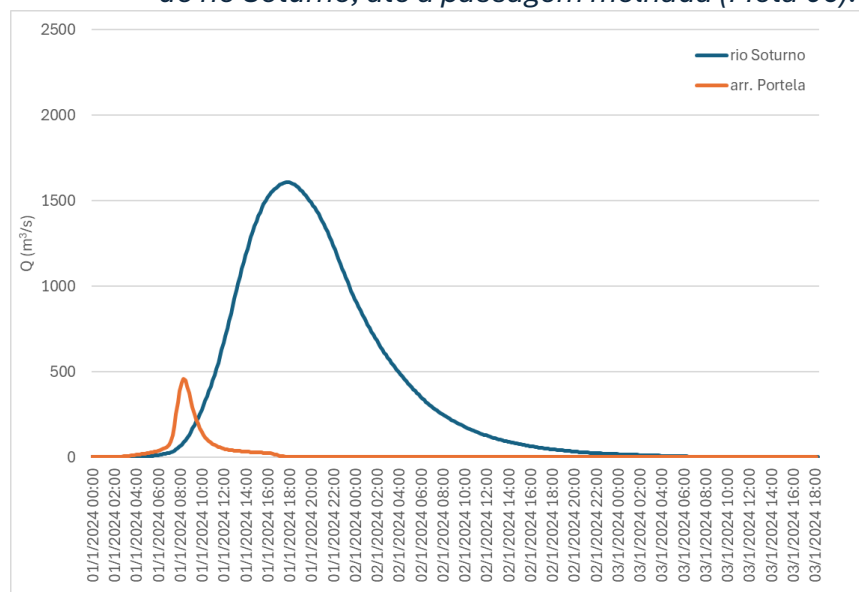
#### 6.4 Vazão de Projeto

Com os parâmetros hidrológicos devidamente ajustados, conforme descrito nos itens anteriores, foram realizadas simulações utilizando os hietogramas de projeto correspondentes aos tempos de retorno de 100 anos e 450 anos, visando determinar as vazões de projeto para a bacia do rio Soturno, até a passagem molhada da Meta 06.

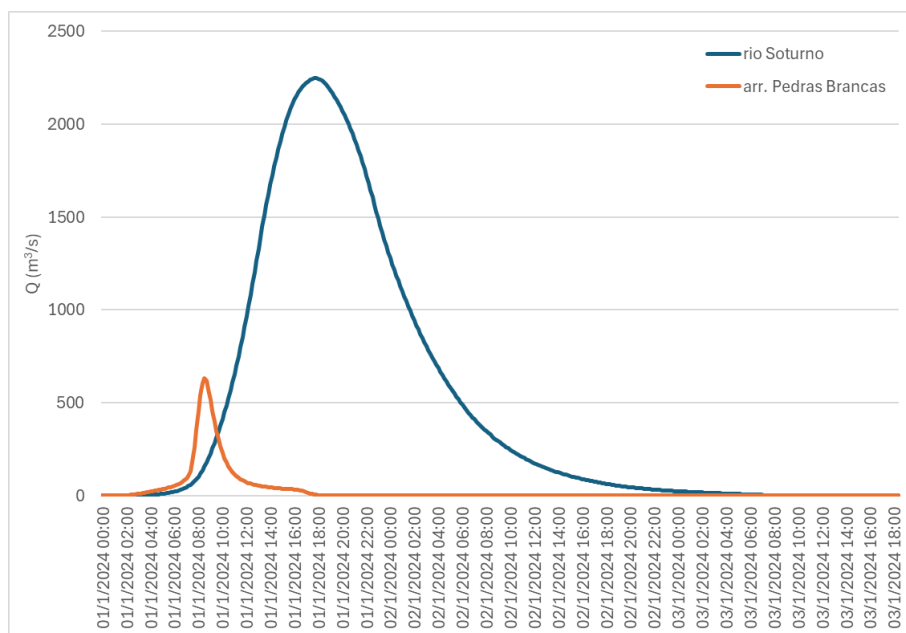
Os hidrogramas resultantes dessas simulações, para os aportes do rio Soturno e do arroio Portela são apresentados na Figura 23 (TR=100 anos) e Figura 24 (TR=450 anos). Observa-se que as vazões máximas obtidas no arroio Soturno foram de 1.607,0  $m^3/s$  para o tempo

de retorno de 100 anos e 2249,0 m<sup>3</sup>/s para o tempo de retorno de 450 anos, enquanto no arroio Portela foram de 457,4 m<sup>3</sup>/s para o tempo de retorno de 100 anos e 634,3 m<sup>3</sup>/s para o tempo de retorno de 450 anos.

*Figura 23. Hidrograma de projeto para 100 anos de tempo de retorno na bacia hidrográfica do rio Soturno, até a passagem molhada (Meta 06).*



*Figura 24. Hidrograma de projeto para 450 anos de tempo de retorno na bacia hidrográfica do rio Soturno, até a passagem molhada (Meta 06).*



A diferença significativa entre as vazões máximas para os dois cenários evidencia o impacto do tempo de retorno no dimensionamento hidráulico. Enquanto a vazão para 100 anos representa um cenário de projeto usualmente adotado para obras de drenagem de grande porte, o valor obtido para 450 anos caracteriza uma condição mais extrema, associada a eventos raros, mas de alta severidade. Essa análise é fundamental para avaliar a segurança estrutural e a resiliência das intervenções propostas, permitindo a definição de margens de segurança adequadas e a mitigação de riscos hidrológicos em situações críticas.

## **7. DETERMINAÇÃO DAS COTAS E VELOCIDADES DE PROJETO**

### **7.1 Ajuste do modelo hidráulico**

Com o objetivo de estimar as cotas e velocidades de projeto no modelo hidráulico HEC-RAS, procedeu-se inicialmente à calibração iterativa desse modelo em conjunto com a calibração hidrológica, conforme descrito no item 6.3 Ajuste do modelo hidrológico. A cota máxima observada no evento de cheia de abril–maio de 2024 foi utilizada como critério de verificação da qualidade da modelagem, tendo como entrada o hidrograma apresentado na Figura 25.

A representação hidráulica do rio Soturno no HEC-RAS incluiu o trecho principal do rio e seções transversais ao longo de sua extensão. As informações geométricas foram obtidas a partir do levantamento topográfico e batimétrico, conforme apresentado em relatório do Levantamento Topobatimétrico. Além das seções medidas, foram inseridas seções adicionais artificiais a intervalos de 20 a 30 metros, de acordo com a complexidade geométrica em planta, visando representar o canal com maior fidelidade. As cotas de fundo dessas seções foram obtidas por interpolação dos dados batimétricos levantados.

Nas regiões de montante e jusante da passagem molhada, onde não havia dados topobatimétricos, as seções geométricas foram determinadas com base nas informações do ANADEM, assumindo-se que a cota de fundo do canal acompanha a declividade topográfica.

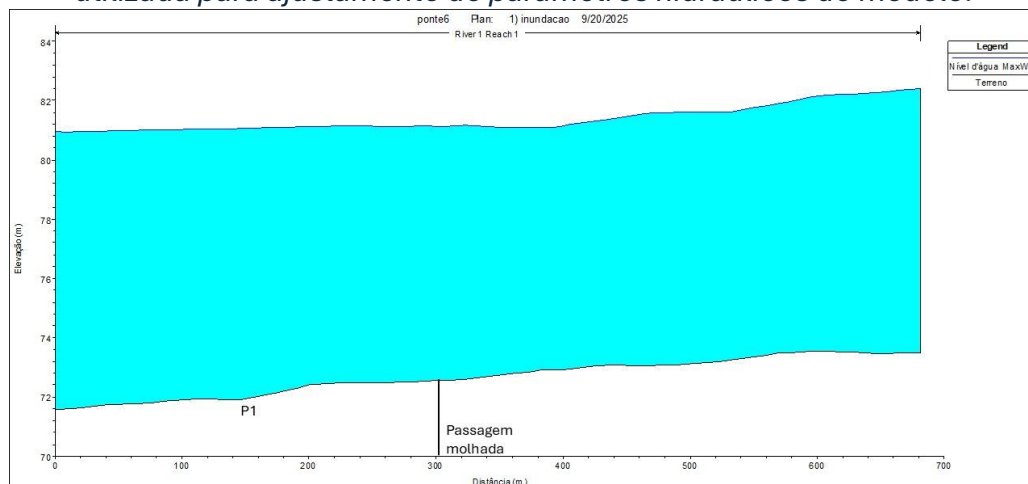
O hidrograma do evento de abril–maio de 2024 foi inserido no modelo para a simulação em regime não permanente (transiente), de modo a considerar a variação temporal da vazão. O esquema topológico da geometria simulada é apresentado na Figura 25, onde o trecho de rio modelado aparece em azul e as seções transversais em verde. Para capturar adequadamente os efeitos hidráulicos na região da passagem molhada (Meta 06), o trecho simulado incluiu um segmento mais extenso do rio, com maior detalhamento na área próxima à estrutura. A batimetria dessas seções foi obtida por interpolação dos dados batimétricos medidos. Na região de montante e jusante da passagem molhada, sem existência de dados topobatimétricos, foi realizada determinação da seção geométrica da calha considerando informações do ANADEM, e assumiu-se que a cota de fundo do rio acompanha a declividade topográfica.

*Figura 25. Esquema topológico de representação no HEC-RAS do trecho do rio Soturno, até a passagem molhada (Meta 06).*



O processo de calibração hidráulica consistiu no ajuste do coeficiente de rugosidade de Manning da calha principal e das margens/planície de inundação, de forma a reproduzir a cota de inundação observada. Após diversas simulações, foram determinados um coeficiente de rugosidade de 0,12 para as margens e planície de inundação e de 0,068 para a calha principal do rio, as quais estão limitadas pelas bordas indicadas em cor vermelho no esquema topológico. O perfil de linha d'água ao longo do eixo longitudinal da calha do rio Soturno modelada no HEC-RAS para o evento de cheia de abril-maio de 2024 é apresentado, com um destaque para a zona da passagem molhada, na Figura 26.

*Figura 26. Perfil longitudinal do trecho rio Soturno para o evento de abril-maio de 2024 utilizada para ajustamento de parâmetros hidráulicos do modelo.*



As seções de montante, no eixo e a jusante do local de implantação da passagem molhada, Meta 06, são apresentadas da Figura 27 até Figura 29, mostrando o nível d'água modelado para a calibração com o evento de cheia de Abril-Maio de 2024 e a seção transversal e distribuição de velocidades correspondentes. Conforme se observa, foi obtida boa coincidência entre as cotas do nível de água simuladas e observadas durante o levantamento de campo para a cheia de abril-maio de 2024. Como referência para este controle, a cota simulada a jusante da passagem molhada, no ponto P1 indicado na Figura 26, foi de **81,06 m**, coincidente com a estimativa medida em campo (**81,12 m**), demonstrando o bom ajuste do modelo.

Os valores de vazão, cota d'água, velocidade média, área, largura de escoamento e número de Froude obtidos durante a calibração estão resumidos na Tabela 9 para as seções de montante, eixo e jusante do local de implantação da passagem molhada da Meta 06, junto ao rio Soturno. A mancha de inundação calibrada para o evento de abril-maio de 2024 é apresentada na Figura 30 e a distribuição espacial de velocidades correspondente é apresentada na Figura 31.

*Tabela 9. Informações de indicadores hidráulicos obtidos durante a calibração do modelo HEC-RAS para cheia de abril-maio de 2024.*

| <b>Seção do rio com relação à passagem molhada</b> | <b>Vazão (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)</b> | <b>Cota d'água (m)</b> | <b>Velocidade média (m.s<sup>-1</sup>)</b> | <b>Seção de escoamento (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Largura da superfície de escoamento (m)</b> | <b>Número de Froude</b> |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------|
| Montante                                           | 1545,45                                     | 81,10                  | 3,72                                       | 500,03                                     | 233,57                                         | 0,47                    |
| <b>Eixo</b>                                        | <b>1545,46</b>                              | <b>81,18</b>           | <b>2,47</b>                                | <b>687,27</b>                              | <b>259,53</b>                                  | <b>0,32</b>             |
| Jusante                                            | 1545,45                                     | 81,14                  | 2,05                                       | 1262,42                                    | 353,15                                         | 0,25                    |

A análise dos resultados da Tabela 9 indica que as vazões simuladas permaneceram praticamente constantes entre as seções de montante e jusante da passagem molhada, evidenciando a continuidade do fluxo. As pequenas variações nas cotas e velocidades refletem as alterações geométricas da calha e o efeito local da estrutura sobre a dinâmica hidráulica. Observa-se que, na seção de montante do eixo da passagem molhada, a velocidade média atinge valores máximos de 3,72 m/s, ocorrendo redução gradual a jusante. O número de Froude inferior a 1 em todas as seções confirma que o escoamento se manteve em regime subcrítico, condição típica para eventos de cheia em rios de planície.

Figura 27. Seção transversal e distribuição de velocidades a montante do eixo da passagem molhada (Meta 06), para o evento de calibração.

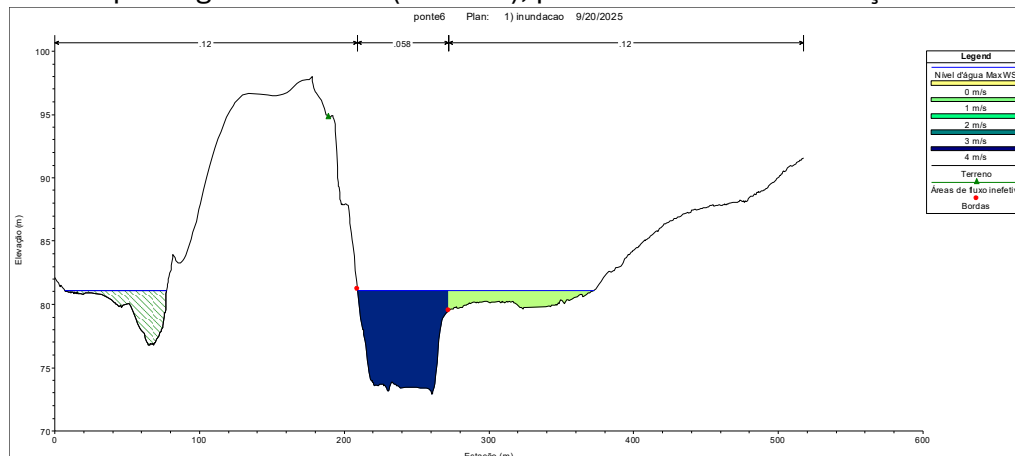


Figura 28. Seção transversal e distribuição de velocidades no eixo da passagem molhada (Meta 06), para o evento de calibração.

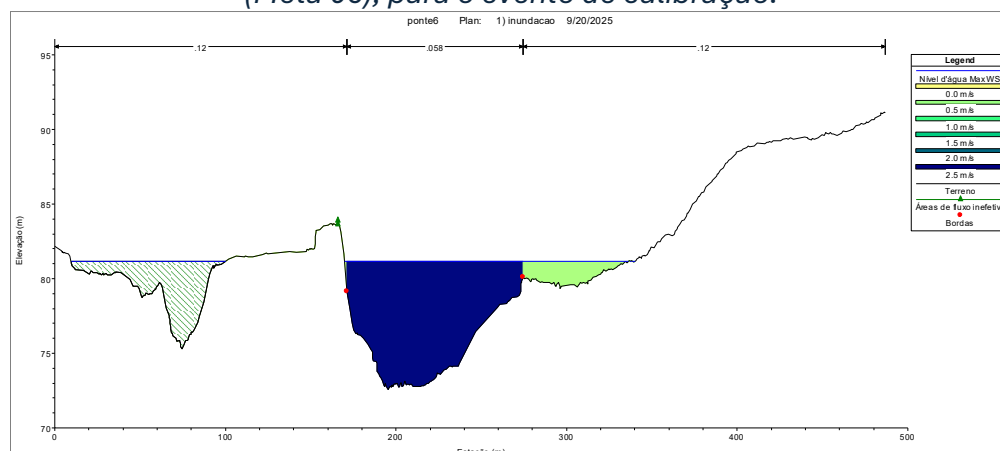


Figura 29. Seção transversal e distribuição de velocidades a jusante do eixo da passagem molhada (Meta 06), para o evento de calibração.

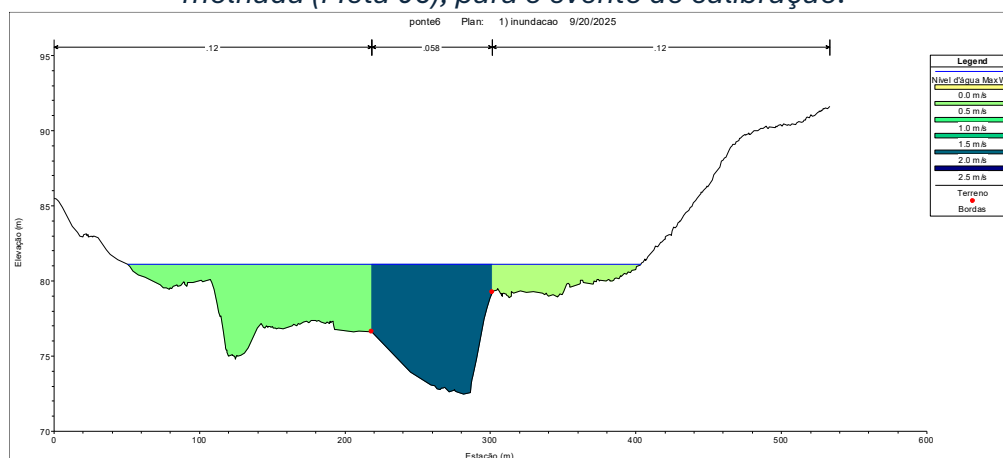
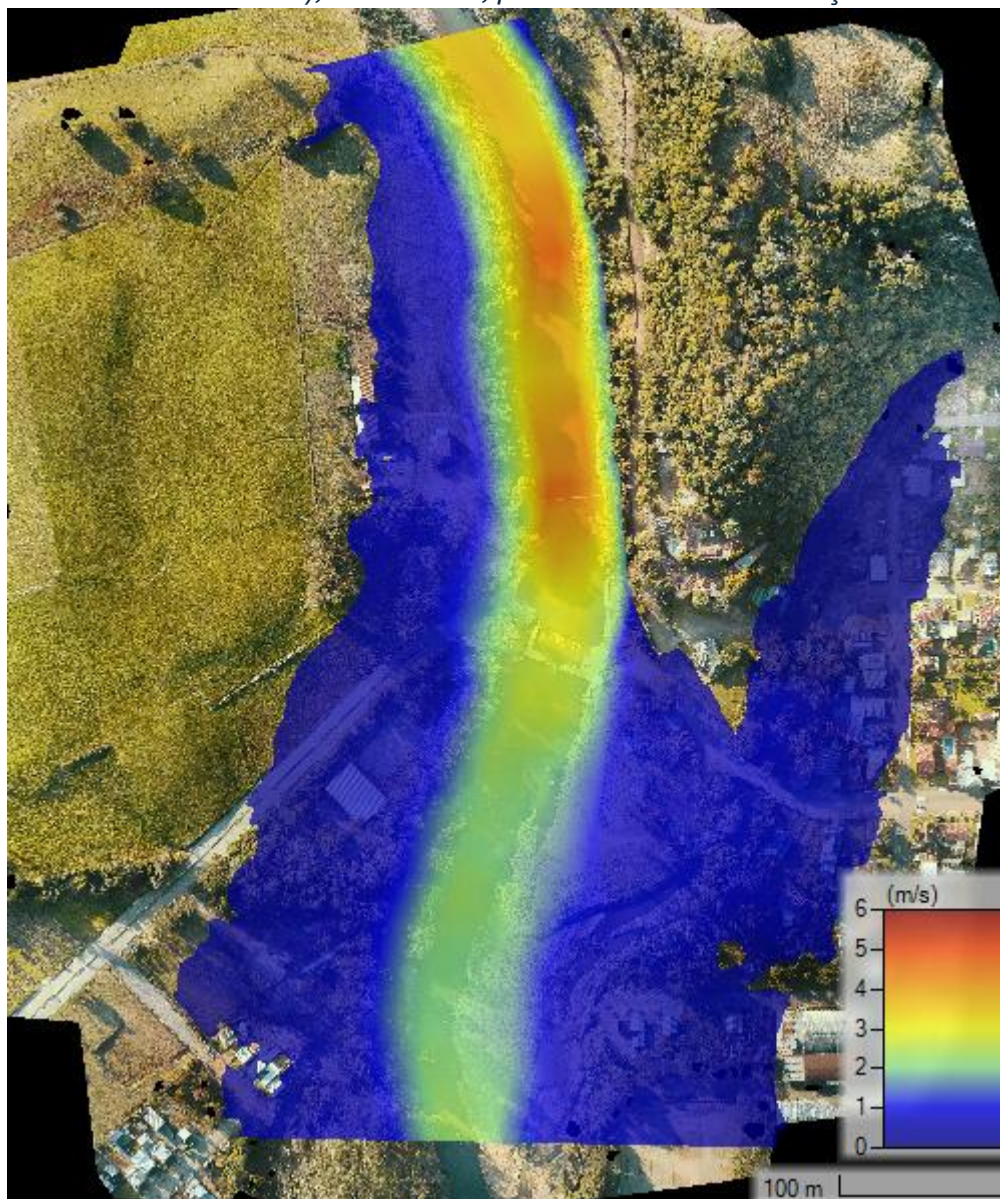


Figura 30. Mancha de inundação simulada na região da passagem molhada (Meta 06), rio Soturno, para o evento de calibração



*Figura 31. Distribuição de velocidades simulada na região da passagem molhada (Meta 06), rio Soturno, para o evento de calibração*



## 7.2 Simulação das vazões de projeto

Uma vez ajustados os parâmetros hidráulicos do HEC-RAS, foi realizada a simulação das vazões de projeto determinadas a partir da introdução dos hidrogramas de projeto com tempos de retorno de 100 (Figura 23) e 450 anos (Figura 24). Essa simulação foi realizada considerando o escoamento em regime não permanente, com as rugosidades previamente

ajustadas. Os resultados de vazão, cota d'água, velocidade média, seção de escoamento, largura da superfície de escoamento e número de Froude para cada cenário são apresentados na Tabela 10.

A Figura 32 mostra o perfil do rio Soturno próximo à passagem molhada (Meta 06), para a vazão de projeto de 100 e 450 anos. Os níveis d'água junto às seções transversais de montante, eixo e jusante da passagem são exibidas da Figura 33 até a Figura 35 para as vazões de projeto. A mancha de inundação e a distribuição de velocidades para o tempo de retorno de 100 anos são apresentadas na Figura 36 e Figura 37, enquanto para o tempo de retorno de 450 anos, na Figura 38 e Figura 39.

*Figura 32. Perfil longitudinal do trecho do rio Soturno, junto à passagem molhada (Meta 06), mostrando a linha d'água para os tempos de retorno de 100 e 450 anos de recorrência.*

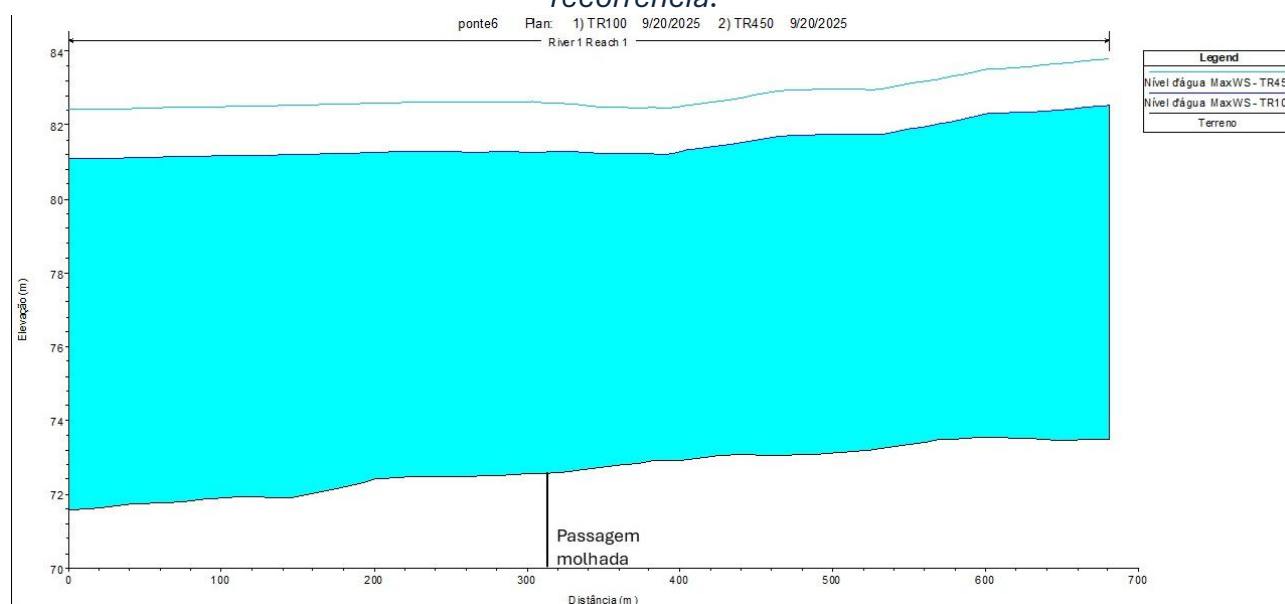


Figura 33. Seção transversal a montante do eixo da passagem molhada (Meta 06), para os eventos de 100 e 450 de tempo de retorno. Distribuição de velocidades para 100 anos de recorrência.

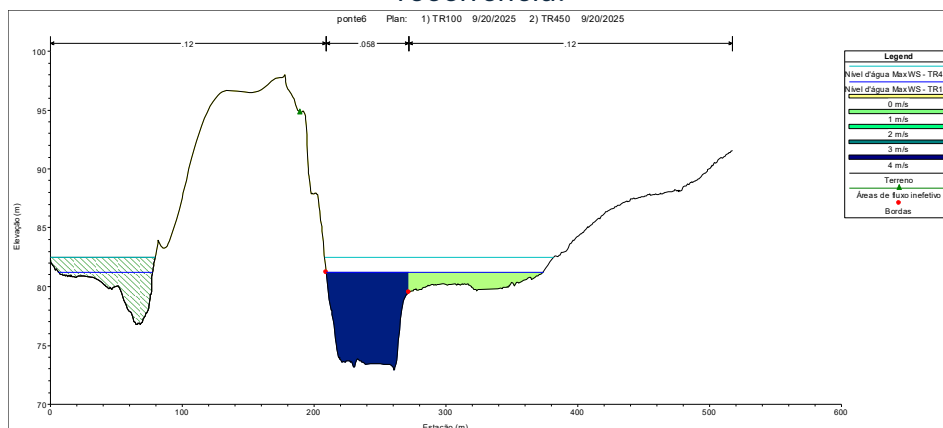


Figura 34. Seção transversal no eixo da passagem molhada (Meta 06), para os eventos de 100 e 450 de tempo de retorno. Distribuição de velocidades para 100 anos de recorrência.

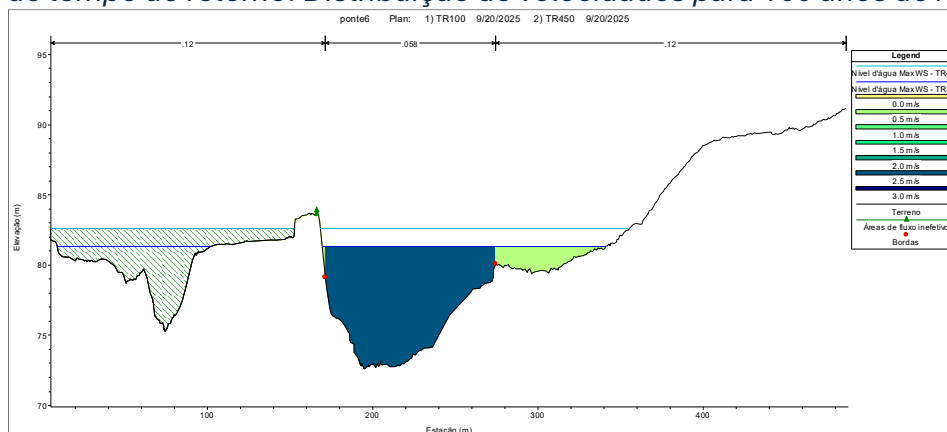


Figura 35. Seção transversal a jusante do eixo da passagem molhada (Meta 06), para os eventos de 100 e 450 de tempo de retorno. Distribuição de velocidades para 450 anos de recorrência.

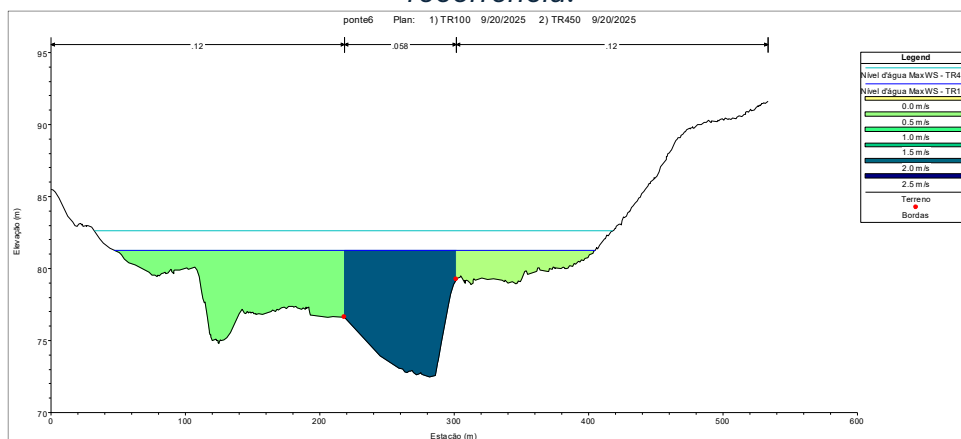
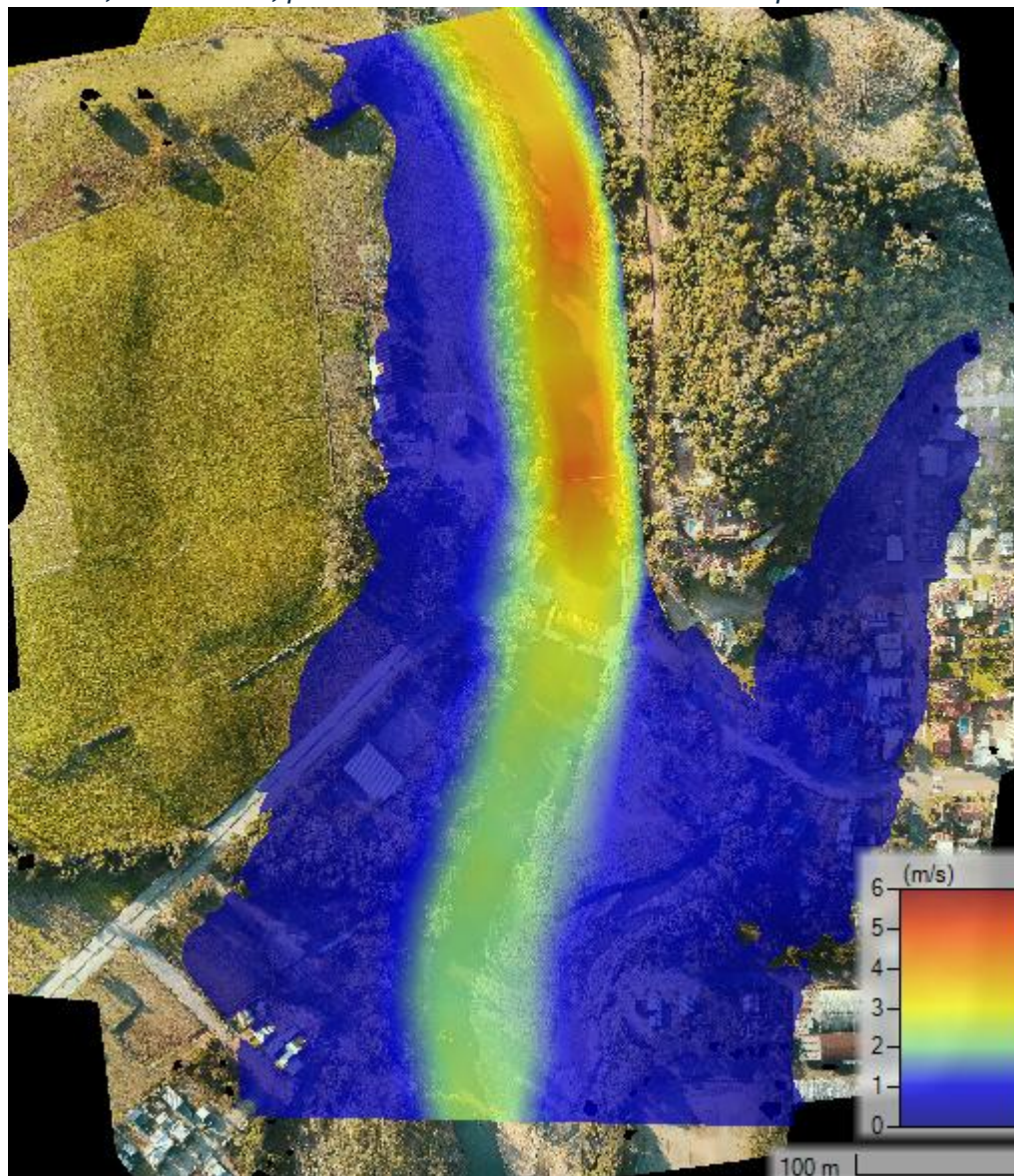


Figura 36. Mancha de inundação simulada na região da passagem molhada da Meta 06, rio Soturno, para o evento com 100 anos de tempo de retorno



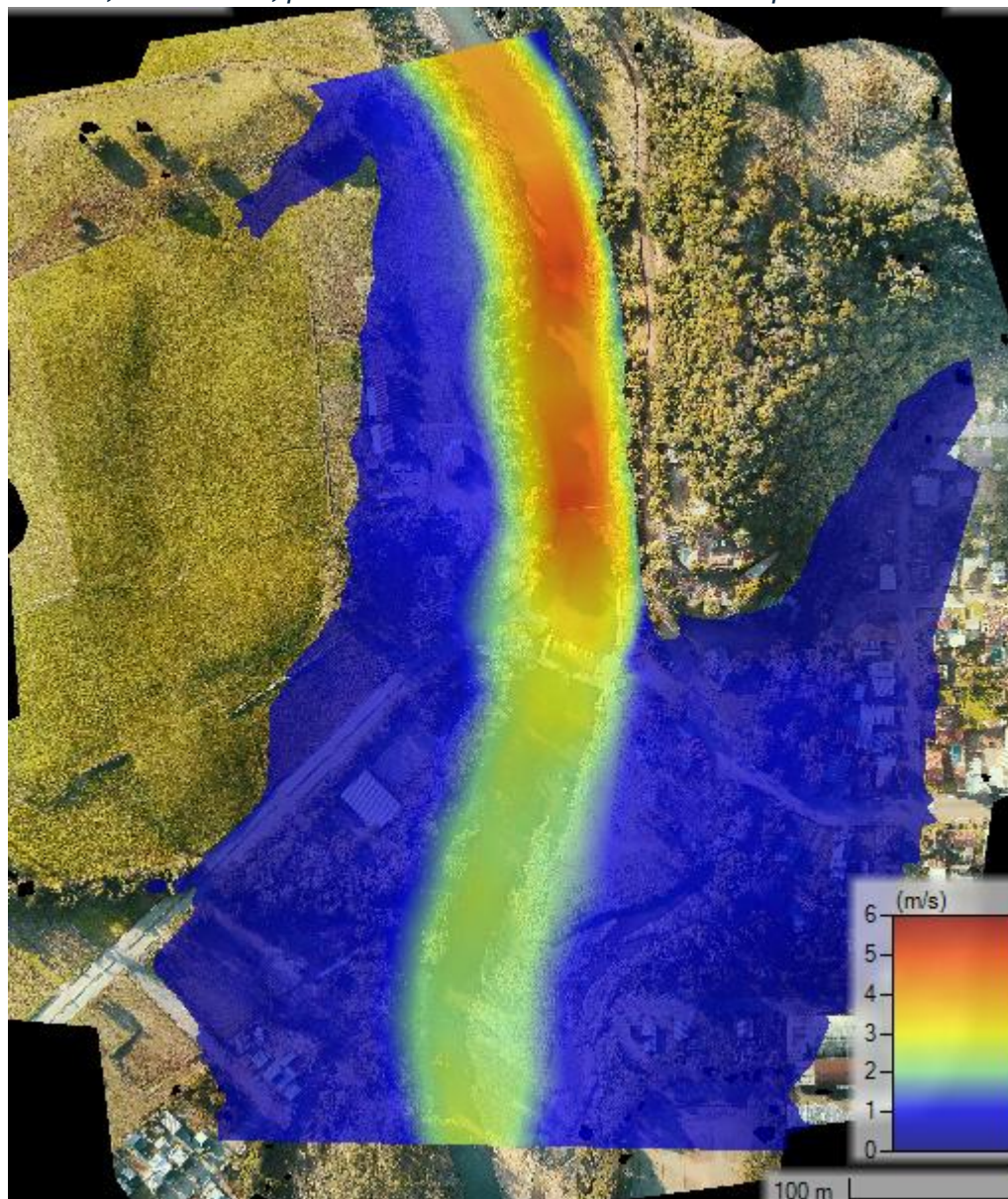
Figura 37. Distribuição de velocidades simulada na região da passagem molhada da Meta 06, rio Soturno, para o evento com 100 anos de tempo de retorno



*Figura 38. Mancha de inundação simulada na região da passagem molhada da Meta 06, rio Soturno, para o evento com 450 anos de tempo de retorno.*



Figura 39. Distribuição de velocidades simulada na região da passagem molhada da Meta 06, rio Soturno, para o evento com 450 anos de tempo de retorno



*Tabela 10. Informações de indicadores hidráulicos obtidos durante a simulação das vazões de projeto de 100 e 450 anos de tempo de retorno resultante da modelagem no HEC-RAS do rio Soturno junto à passagem molhada (Meta 06).*

| TR (anos) | Seção do rio com relação à passagem molhada | Vazão (m <sup>3</sup> .s-1) | Cota d'água (m) | Velocidade média (m.s <sup>-1</sup> ) | Seção de escoamento (m <sup>2</sup> ) | Largura da superfície de escoamento (m) | Número de Froude |
|-----------|---------------------------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|------------------|
| 100       | Montante                                    | 1606,55                     | 81,23           | 3,77                                  | 521,19                                | 236,17                                  | 0,47             |
|           | <b>Eixo</b>                                 | <b>1606,58</b>              | <b>81,31</b>    | <b>2,50</b>                           | <b>709,76</b>                         | <b>264,14</b>                           | <b>0,32</b>      |
|           | Jusante                                     | 1606,57                     | 81,27           | 2,07                                  | 1311,15                               | 357,97                                  | 0,25             |
| 450       | Montante                                    | 2248,81                     | 82,48           | 4,15                                  | 732,70                                | 253,08                                  | 0,48             |
|           | <b>Eixo</b>                                 | <b>2248,83</b>              | <b>82,58</b>    | <b>2,82</b>                           | <b>937,87</b>                         | <b>339,60</b>                           | <b>0,33</b>      |
|           | Jusante                                     | 2248,83                     | 82,61           | 2,21                                  | 1809,23                               | 385,74                                  | 0,25             |

A partir dos resultados obtidos na simulação dos eventos de projeto destacam-se velocidades máximas de 3,77 m.s<sup>-1</sup> para o tempo de retorno de 100 anos e de 4,15 m.s<sup>-1</sup> para 450 anos, superior ao valor obtido no processo de calibração para o evento de cheia de abril-maio de 2024. As máximas velocidades são obtidas em região imediatamente a montante do eixo da passagem molhada.

Com o incremento do tempo de retorno, observa-se, além do aumento das velocidades, a elevação das cotas d'água e expansão da largura da superfície de escoamento. Essa ampliação da área de escoamento indica maior ocupação da planície de inundação, potencializando impactos em áreas adjacentes e aumentando o risco de instabilidade estrutural em elementos construtivos expostos. Do ponto de vista do dimensionamento, esses resultados reforçam a importância de considerar cenários extremos (como TR = 450 anos) para avaliação de segurança hidráulica da passagem molhada e definição de obras complementares de proteção contra erosão, minimizando a vulnerabilidade frente a eventos raros, mas de alta severidade.

Foi obtida cota de cheia de 81,31 m para TR de 100 anos e de 82,48 m para o TR de 450 anos. Ambas as cotas de projeto superam a cota de cheia de Abril-Maio de 2024 que, de acordo com relatório de levantamento topobatimétrico, atingiu 81,12 m. A diferença de 1,27 m

entre os dois cenários de projeto reforça a importância de considerar o TR de 450 anos para aumentar a resiliência estrutural — recomendação presente na Nota Técnica do IPH (2024) sobre adaptação de pontes às mudanças climáticas. Assim, caso seja mantida a cota de 74,29 m (cota original aproximada da passagem molhada destruída) para a reconstrução da passagem molhada, deve ser observada a sobre-elevação da lâmina de água sobre a mesma, da ordem de 8,29 m (TR 450), bem como as velocidades que superam os  $4,15 \text{ m.s}^{-1}$  logo a montante do eixo da estrutura. Essas condições aumentam as solicitações hidráulicas sobre a passagem molhada, e reforçam a necessidade de obras para garantir a estabilidade da estrutura.

## 8. RECOMENDAÇÕES

Os estudos hidrológicos apresentados neste documento foram desenvolvidos conforme a IS-121/21, com base no projeto estrutural entregues à equipe executora durante a fase de anteprojeto. Caso ocorram modificações geométricas no projeto executivo final, os resultados aqui apresentados deverão ser reavaliados.

Considerando as incertezas decorrentes da falta de informações locais — que demandaram o uso de metodologias simplificadas — recomenda-se fortemente a instalação de pluviômetro e régua limnimétrica no local, com monitoramento subdiário. Idealmente, esses equipamentos devem dispor de monitoramento remoto em tempo real (telemetria), integrando os dados a sistemas de alerta e órgãos de defesa civil.

Recomenda-se executar inspeções periódicas pós-eventos extremos para verificação de erosões localizadas, recalques de fundação e obstruções na calha, bem como realizar inspeções anuais de rotina em conformidade com as normativas aplicáveis a pontes e obras de arte especiais.

A modelagem hidrológica e hidráulica deve ser reavaliada caso ocorram mudanças relevantes no uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica, que possam alterar parâmetros como CN e tempo de concentração.

Conforme discutido ao longo do relatório, a atualização da relação IDF utilizada neste estudo indica que muitas obras de drenagem existentes podem estar subdimensionadas, em função do aumento na frequência de eventos de elevada intensidade e curta duração. Essa constatação reforça a necessidade de revisão abrangente das estruturas de drenagem e transporte na região, contemplando rotas alternativas e medidas para ampliar a resiliência das infraestruturas frente a eventos extremos.

Por fim, observa-se que no local de estudo não existe RN (Referência de Nível) implantado. Embora tenha sido realizado levantamento topográfico de alta precisão, não foi possível, devido ao tempo disponível, implantar um RN formal. Recomenda-se que, durante a

elaboração do projeto executivo, seja implantado um RN fixo para utilização durante a construção da passagem molhada, em levantamentos futuros e no monitoramento da estrutura ao longo de sua vida útil

## 9. EQUIPE TÉCNICA

|                                          |                                                                                   |                                                                       |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Eng. Dr. Daniel Gustavo Allasia Piccilli | Eng. Hidráulico e Eng. Civil – Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental | Coordenador geral. Especialista em modelagem hidrológica e hidráulica |
| Enga. Dra. Rutineia Tassi                | Eng. Civil – Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental                  | Especialista em modelagem hidrológica e hidráulica                    |
| Eng. Dr. João Francisco Carlexo Horn     | Eng. Ambiental – Doutor em Engenharia Agrícola                                    | Especialista em hidrometria                                           |
| Eng. Limber Zenteno Aguilera             | Eng. Civil                                                                        | Especialista em Geoprocessamento                                      |
| Enga. Yamila Chicherit                   | Engenheira Hídrica                                                                | Especialista em modelagem hidrológica e hidráulica                    |

Santa Maria, 26 de Setembro de 2025.

Profa. Enga. Rutineia Tassi

CREA RS104272  
RNP 2206029642

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLAN, R. El Nino Southern Oscillation and climatic variability. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Melbourne (Australia). 1996. & GRIMM, A. M., BARROS, V. R., & DOYLE, M. E. Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events Journal of Climate, v. 13, n. 1, p. 35-58, 2000. 107 CPTEC/INPE. 2021. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 03 de novembro de 2021

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014. & BECK, H.; ZIMMERMANN, N.; MCVICAR, T. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. Sci Data 5, 180214, 2018.

ANA. Produto 2: Base de dados e relatório sobre a consolidação de mapas de solo. 2017.

Anderson, T. W.; Darling, D. A. (1952). "Asymptotic theory of certain "goodness-of-fit" criteria based on stochastic processes". Annals of Mathematical Statistics. 23 (2): 193–212. doi:10.1214/aoms/1177729437.

Arneson, L. A., et al. *Evaluating scour at bridges*. No. FHWA-HIF-12-003. National Highway Institute (US), 2012.

Arnold, Taylor B.; Emerson, John W. (2011). «Nonparametric Goodness-of-Fit Tests for Discrete Null Distributions» (PDF). The R Journal. 3 (2): 34–39

Ascar, 2018. 252 p. il. Color

ASSAD, M.L.L.; ASSAD, E.D. & EVANGELHISTA, B.A. Chuvas extremas na região dos cerrados. In: ASSAD, C.D., coord. Chuva no cerrado: análise e espacialização. Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1994. p.49-54.

ÁVILA, Lauren Cortezia. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7852>. Acesso em: 29 de setembro de 2020. Orientador: Maria do Carmo Cauduro Gastaldin

BASSO, R. E.; ALLASIA, D.G.; TASSI, R.; PICKBRENNER, K. Revisão das isozonas de chuvas intensas do Brasil. Engenharia Sanitária e Ambiental, 21 (04): 635-641, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016133691>.

BASTOS, Gustavo A. P., 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7665> Acesso em: 25 de setembro de 2020. Orientador: Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva

BATISTEL, Leonardo. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/14565>. Acesso em: 30 de setembro de 2020. Orientador: João Batista Dias de Paiva

BORBA, W.F.; SILVÉRIO DA SILVA, J.L.; ALLASIA, D.G.; ROSA, C. N.; FAVARETTO, J.R.; RIBEIRO, L.F.T. Geoprocessamento Aplicado à Determinação do Índice de Susceptibilidade das Captações por Poços Tubulares do Sistema Aquífero Serra Geral em Frederico Westphalen - Rio Grande do Sul. Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ. Impresso), v. 39, n. 3, p. 79 - 88, 2016.

BORBA, WF, Cristiano Niederauer da ROSA, C., FAVARETTO, JR, MENEGAZZO, KC, PIMENTEL, G, SOUZA, E. 2023. Universidade Federal de Santa Maria. GEOPROCESSAMENTO APLICADO A ESTIMATIVA DA SUSCEPTIBILIDADE À CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO SERRA GERAL: ESCALA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DA VÁRZEA. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 41, n. 2, p. 405 - 415, <https://doi.org/10.5016/geociencias.v41i02.15702>

BORTOLIN, T. A.; REGINATO, P. A. R.; LEAO, M. I.; SCHNEIDER, V. A. Hidrogeologia e hidroquímica dos aquíferos fraturados associados às rochas vulcânicas ácidas no Município de Carlos Barbosa (RS). Revista Ambiente & Água, v. 9, p. 55 - 67, 2014.

Brasil. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem. - 2. ed. - Rio de Janeiro, 2005. 133p. (IPR. Publ., 715)

Brasil. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Diretrizes básicas para estudos e projetos rodoviários instruções para apresentação de relatórios. - Rio de Janeiro, 2006

Buffon 2008. PARECER DOCUMENTO DAT-MA Nº 2394/2008. UNIDADE DE ASSESSORAMENTO AMBIENTAL. GEOPROCESSAMENTO – BACIAS HIDROGRÁFICAS.

CASALI, Carlos Alberto. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/5472>. Acesso em: 29 de setembro de 2020. Orientador: Danilo Rheinheimer dos Santos.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; DIAS, M. A. F. S. & Silva, M. G. A. J. Tempo e clima no Brasil. 2009. São Paulo: Oficina de Textos. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001833489>. Acesso em: 23 de julho de 2021. & REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. REGIMES DE PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n. 2, p. 185 – 204, 2010.

CECONI, Denise Ester. 2010. Tese (Doutorado em Ciências do Solo). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/3322>. Acesso em: 29 de setembro de 2020. Orientador: Flavio Luiz Foletto Eltz.

CHOW, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos* (1ra ed.). McGraw-Hill.

CODEMAU - CONSELHO REGIONAL DE DESENVOLVIMENTO DO MÉDIO ALTO URUGUAI. Plano estratégico de desenvolvimento regional. Frederico Westphalen: Grafimax, 2010. 219p.

CONTERATTO, Taiane Menezes. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7918>. Acesso em: 29 de setembro de 2020. Orientador: Maria do Carmo Cauduro Gastaldini.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul, Escala 1:750.000. Porto Alegre: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2006.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. SIAGAS: Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acessado em: 20 de maio 2019.

Denise R. Alho. José M. Júnior. 2007. Milton C. C. Campos Caracterização física, química e mineralógica de Neossolos Litólicos de diferentes materiais de origem. Revista Brasileira de Ciências Agrárias. v.2, n.2, p.117-122, abr.-jun., 2007. Recife, PE, UFRPE. [www.agrariaufrpe.com](http://www.agrariaufrpe.com). Protocolo 110 - 30/05/2007.

Departamento de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande Do Sul (DRH/SEMA). 2012. Processo de Planejamento da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí. PROCESSO ADMINISTRATIVO nº 004714-0500/09.6. Relatório Final. 93p

DIRKS, K.N.; HAY, J.E.; STOW, C.D. & HARRIS, D. High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island Part II: Interpolation of rainfall data. J. Hydrol., 208:187-193, 1998.

DNIT, 2022. Conceitos Básicos de Hidrologia e Drenagem para Projetos Rodoviários. Módulos 2 – Pluviometria. Disponível em: [https://repositorio.enap.gov.br/jspui/bitstream/1/7814/2/M\\_C3\\_B3dulo\\_202\\_20-20Pluviometria.pdf](https://repositorio.enap.gov.br/jspui/bitstream/1/7814/2/M_C3_B3dulo_202_20-20Pluviometria.pdf). Aceso em: 10 de outubro de 2024.

FACINI, L. Relatório de Erosão do Solo e Produção de Sedimentos na Bacia Hidrográfica (G060) dos Rios Vacacaí Vacacaí- Mirim. 2019.

FAVARETTO, Jean Ricardo. CONSISTENCY ANALYSIS AND REGIONALIZATION OF MAXIMUM PRECIPITATION OCCURED IN RIO GRANDE DO SUL BETWEEN 1912 2014.. 2016. 764 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER. 2024. U - 100, Várzea. Disponível em: [http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/bacia\\_uru\\_varzea.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/bacia_uru_varzea.asp). Acessado em: 13 de setembro de 2024

FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL LUIZ CARLOS ROESSLER. Arquivo digital para uso em SIG - Base cartográfica digital do RS 1:250.000. Disponível em: <[http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases\\_geo.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp)>. Acesso em: 10 janeiro de 2024.

FOLETO, E. M.; ZIANI, P. Contribuições para o Plano de Manejo de propostas de Unidades de Conservação em Santa Maria/RS. Ateliê geográfico (UFG), v. 11, p. 142, 2017. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/atelie/article/view/34944>. Acesso em: 02 de outubro de 2020.

FREITAS, M.A.; BINOTTO, R.B.; NANNI, A.S.; RODRIGUEZ, A.L.M.; BORTOLI, C.R. Avaliação do potencial hidrogeológico, vulnerabilidade intrínseca e hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - Brasil. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 7, n. 1, p. 31 - 41, 2012.

GALDINO, CHPA; Mainardi Fan, F.; Fernandes Marques, G. 2017 Simulação Hidrológica De Um Trecho Da Bacia Do Rio Jaguarizinho Com Horarização Da Precipitação Diária. In Anais do: XXII SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Local: Florianópolis – SC. ISSN: 2318-0358.

GENOVEZ, A.B. Vazões máximas. In: PAIVA, J.B.D. & PAIVA, E.M.C.D., orgs. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001. p.33-112.

Gonçalves dos Santos, H et al..Sistema Brasileiro de Classificação de Solos– 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356 p. : il. color. ; 16 cm x 23 cm.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Decreto nº 53.885, de 16 de janeiro de 2018. Institui subdivisão das Regiões Hidrográficas do Estado do Rio Grande do Sul em Bacias Hidrográficas. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201803/08095109-decreto-53885-2017.pdf>. Acessado em: 13 de setembro de 2024..

GRAEPIN, Cristiane. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7657>. Acesso em: 29 de setembro de 2020. Orientador: Maria do Carmo Cauduro Gastaldini.

HORN, J. F. C.; SILVEIRA, G. L. Monitoramento fluviométrico de duas bacias hidrográficas vizinhas: comparação de vazões em períodos concomitantes. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, p. 809-816, 2015. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=182&SUMARIO=5109>. Acesso em: 29 de setembro de 2020.

HORN, João Francisco Carlexo. 2016. Tese (Doutorando em Engenharia Agrícola). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/3641> . Acesso em: 25 de setembro de 2020. Orientador: Geraldo Lopes da Silveira

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Malha digital municipal. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acessado em: 13 de Setembro de 2024.

IBGE. Manual técnico de uso da terra. 3ª Edição, 2013.

ILHA, Róbson. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7594>. Acesso em: 30 de setembro de 2020. Orientador: João Batista Dias de Paiva.

IPH-UFRGS. 2021. Manual de Aplicação plugin ANADDataAcquisition V1.0. ManualTécnico, HGE, IPH,UFRGS.

JAXA. (2015). ALOS PALSAR. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/>.

JENSON, S. K. Applications of hydrological information automatically extracted from digital elevation models. *Hydrological Processes*, v. 5, p. 31–44, 1991. doi:10.1002/hyp.3360050104.

KEMERICH, P. D. C.; MARTINS, S. R.; KOBIYAMA, M. ; de Borba, W. F. ; RITTER, L. G. . Determinação do índice de risco da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim com o uso de indicadores de perigo e vulnerabilidade. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 15, p. 2951-2969, 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/273991409\\_DETERMINACAO\\_DO\\_INDICE\\_DE\\_RISCO\\_DA\\_BACIA\\_HIDROGRAFICA\\_DO\\_RIO\\_VACACAI\\_MIRIM\\_COM\\_O\\_USO\\_DE\\_INDICADORES\\_DE\\_PERIGO\\_E\\_VULNERABILIDADE](https://www.researchgate.net/publication/273991409_DETERMINACAO_DO_INDICE_DE_RISCO_DA_BACIA_HIDROGRAFICA_DO_RIO_VACACAI_MIRIM_COM_O_USO_DE_INDICADORES_DE_PERIGO_E_VULNERABILIDADE). Acesso em: 28 de setembro de 2020.

KEMERICH, P.D.C.; MARTINS, S. R.; KOBIYAMA, M.; DESCOVI FILHO, L. L. V.; BORBA, W. F ; SOUZA, E. E. B.; FERNANDES, G. D. ANÁLISE DA VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA: COMPARATIVO ENTRE A METODOLOGIA GOD E DRASTIC. *REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE*, v. 6, p. 45-53, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/19080/13103>. Acesso em: 29 de setembro de 2020.

KEMERICH, Pedro Daniel da Cunha; MARTINS, Sergio Roberto; KOBIYAMA, Masato; BURIOL, Galileo Adeli; CRUZ, Rafael Cabral; RITTER, Luciana Gregory; DULAC, Vinicius Ferreira. Efetividade do comitê de gerenciamento de recursos hídricos na bacia hidrográfica dos rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim. *RECURSOS HÍDRICOS (LISBOA)*, v. 34, p. 13-24, 2013. Disponível em: <https://www.aprh.pt/rh/v34n2-2.html> . Acesso em: 29 de setembro de 2020.

KER, J. Latossolos do Brasil: uma revisão. *Geonomos*. V.5, n.1, 1997.

KUCHINSKI, Vinícius. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7914>. Acesso em: 29 de setembro de 2020. Orientador: Maria do Carmo Cauduro Gastaldini.

Laipelt, L.; de Andrade, B.C.C.; Collischonn, W.; Amorim, A.; Paiva, R.C.D.; Ruhoff, A. 2024. ANADEM: A digital terrain model for South America” Submetido para publicação na *Remote Sensing*. Disponível para download em: <https://www.preprints.org/manuscript/202404.1305/v1>.

LINDSAY, J. B. (2016). WhiteboxTools: An open-source geospatial data analysis platform. Disponível em: <https://www.whiteboxgeo.com/>.

LINDSAY, J. B.; ROTHWELL, J. J.; DAVIES, H. Mapping outlet points used for watershed delineation onto DEM-derived stream networks. *Water Resources Research*, v. 44, W08442, 2008. doi:10.1029/2007WR006507.

MACHADO, J.L.F. & FREITAS, M.A. Projeto mapa hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul, relatório final, Escala 1:750.000. Porto Alegre: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2005.

MALLMANN, Maria Helena. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). A formação do Comitê do Rio Vacacaí e Vacacaí Mirim e a Regulação Social do uso da Água na cultura de arroz. Orientador: Benedito da Silva Neto.

MARCHESAN, Enio; Sartori, Gerson Meneghetti Sarzi ; AVILA, Luis Antonio de ; MACHADO, Sérgio Luiz de Oliveira ; ZANELLA, Renato ; PRIMEL, Ednei Gilberto ; MACEDO, Vera Regina Mussoi ; Marchezan, Marcos Garcia . Resíduos de agrotóxicos na água de rios da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. *Ciência Rural* (UFSM. Impresso), 2010. <https://www.scielo.br/pdf/cr/v40n5/a574cr2775.pdf>. . Acesso em: 28 de setembro de 2020.

MARCHESAN, Enio; Sartori, Gerson Meneghetti Sarzi ; REIMCHE, Geovane Boschmann ; AVILA, Luis Antonio de ; ZANELLA, Renato ; MACHADO, Sérgio Luiz de Oliveira ; MACEDO, Vera Regina Mussoi ; Cogo, Juliana Pivetta . Qualidade de água dos rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. *Ciência Rural* (UFSM. Impresso), v. 39, p. 2050-2056, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/cr/v39n7/a293cr948.pdf>. Acesso em: 28 de setembro de 2020

MELOS, N. D.; FACCO, D. S.; AIMON, J. G. S.; BENEDETTI, A. C. P. Disponível em: <https://docplayer.com.br/38999912-15o-congresso-brasileiro-de-geologia-de-engenharia-e-ambiental-diagnostico-ambiental-da-bacia-hidrografica-do-rio-vacacai.html>. Acesso em: 11 de junho de 2020.

MICHELOTTI, Deise., 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7921>. Acesso em: 07 de junho de 2020. Orientador: Joao Batista Dias de Paiva.

MIGUEL, Pablo. 2013. Tese (Doutorado em Ciências do Solo). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/3341>. Acesso em: 28 de setembro de 2020. Orientador: Ricardo Simão Diniz Dalmolin.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 14 Set. 2024

NASCIMENTO, D. B.; FOLETO, E. M. Delimitação Espacial de Uma Unidade de Conservação: O Caso da Área de Proteção Ambiental do Vacacaí-Mirim/RS. *Geo UERJ*, v. 1, p. 62-87, 2014. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/geouerj/article/view/5710>. Acesso em: 02 de outubro de 2020.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, v. 28, n. 3, p. 323-344, 1984.

OPPA, L. F.; GASTALDINI, M. C. C ; MISSIO, D. . Análise da sensibilidade em modelo de qualidade da água aplicado à bacia do Rio Vacacaí Mirim/RS.. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - 8º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 2007, São Paulo. Gestão de Recursos Hídricos, Integração de Políticas e Sustentabilidade do Meio Ambiente Urbano. Porto Alegre: ABRH, 2007. p. 1-16.

ORMENTINI, Thiago Augusto. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7756>. Acesso em: 29 de setembro de 2020. Orientador: Maria do Carmo Cauduro Gastaldini.

Peel, M. C.; Finlayson B. L. & McMahon, T. A. (2007). «Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification» (PDF). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **11** (5): 1633–1644. ISSN 1027-5606. doi:10.5194/hess-11-1633-2007

PINTO, F.R.L. Equações de intensidade-duração-freqüência da precipitação para os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo: estimativa e espacialização. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 70p. (Tese de Mestrado).

PIVETTA, Gláucia Ghesti. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/12974>. Acesso em: 29 de setembro de 2020. Orientador: Maria do Carmo Cauduro Gastaldini.

RIZZARDI, A. S.; RIGHES, A. A.; KEMERICH, P. D. C.; SILVA, R. F.; SANTOS, S. A.; BORBA, W. F. Atributos físicos e fluxo de água em solos da bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim – RS. *Revista Monografias Ambientais*, v. 13, p. 3690-3701, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/14260/pdf>. Acesso em: 29 de setembro de 2020.

Robaina, L. E. S. et al 2010. Compartimentação geomorfológica da bacia hidrográfica do Ibicuí, Rio Grande do Sul, Brasil: proposta de classificação. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 11, n.2, p.11-23, 2010. Available from:

ROMAN, C.A. Controle da Drenagem na Fonte e sua compatibilização ao Plano Municipal de Saneamento Ambiental de Santa maria. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado, 144p, 2015.

ROSSATO, M. S. Os climas do Rio Grande do Sul : variabilidade, tendências e tipologia. Tese (Programa de Pós-Graduação em Geografia). Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/32620>. Acesso em: 23 de julho de 2021

SANTOS, T. O., SILVA, J. S., VENTURA, G. P. S., SILVA, G., & VIEIRA, L. J. O. (2018). A utilização dos métodos de medição acústico doppler e flutuador como ferramenta para medição de vazão e velocidade em corpos hídricos–notas de uma experiência de campo. *Acta Geográfica*, v. 12, n. 28, p. 170-177, 2018. <http://dx.doi.org/10.5654/acta.v12i28.4856>

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

SCHMIDT FILHO, Osmar. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7660>. Acesso em: 28 de setembro de 2020. Orientador: João Batista Dias de Paiva.

SELUCHI, M.; R. GARREAUD. Campos Medios e procesos físicos associados ao ciclo de vida da baixa do chaco. *Revista Brasileira de Meteorología*, v. 27, p. 444-457, 2012.

SILVA, D.D.; VALVERDE, A.E.L.; PRUSKI, F.F. & GONÇALVES, R.A.B. Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência da precipitação para o Estado de São Paulo. *R. Eng. Agric.*, 7:70-87, 1999.

Silva, J. R. C.; Paiva, J. B. Retenção de sedimentos por cordões de pedra em contorno em uma encosta de Litossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.9, p.77-

Silva, J. R. C.; Silva, F. J. da. Eficiência de cordões de pedra em contorno na retenção de sedimentos e melhoramentos de propriedades de um solo Litólico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.21, p.447-456, 1997a.

Silva, J. R. C.; Silva, F. J. da. Produtividade de um solo litólico associado ao controle de erosão por cordões de pedra em contorno. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.21, p.435-440, 1997b.

Solos do Rio Grande do Sul /

SOUZA, Marielle Medeiros. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/19499>. Acesso em: 29 de setembro de 2020. Orientador: Maria do Carmo Cauduro Gastaldini.

Streck, EV et al. Solos do Rio Grande do Sul– 3. ed., rev. e ampl. – Porto Alegre, RS: Emater/RS-

TAYLOR, John R., “An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements”, 1997, 2.ed.

TEIXEIRA, Laís Coelho. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7651>. Acesso em: 28 de setembro de 2020. Orientador: João Batista Dias de Paiva.

VALCORTE, Pablo Weber. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/15098>. Acesso em: 28 de setembro de 2020. Orientador: João Batista Dias de Paiva.