

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA

Pró-Reitoria de Inovação e Empreendedorismo (PROINOVA)

Pró-Reitoria de Planejamento (PROPLAN)

**ESTUDO HIDROLÓGICO PARA O DESENVOLVIMENTO
DOS ANTEPROJETOS DE ENGENHARIA
PARA A RECONSTRUÇÃO DE PONTES**

**DISPENSA DE LICITAÇÃO Nº 252/2024 - Ponte sobre o Rio
Jaguari na localidade de Passo da França - Município de São
Vicente do Sul, RS**



Fonte Imagem: PROTOCOLO Nº REC-RS-4319802-20240607-01

Santa Maria

Fevereiro de 2025



UFSM
Pró-Reitoria de
Planejamento

**COORDENADORIA DE PROJETOS
E CONVÊNIOS (COPROC)**



UFSM
Pró-Reitoria de Inovação
e Empreendedorismo



Sumário

1. OBJETO	5
2. INTRODUÇÃO	6
3. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA	8
3.1 Localização e clima	8
3.2 Relevo, geomorfologia e pedologia	10
3.3 Uso e ocupação do solo.....	15
4. METODOLOGIA.....	18
4.1 Coleta de dados	18
4.1.1 Dados hidrometeorológicos.....	18
4.1.2 Dados topobatimétricos	19
4.2 Processamento de Dados para Determinação de Vazão	22
4.2.1 Análise estatística dos dados hidrometeorológicos	22
4.2.2 Adequação dos critérios de projeto seguindo as recomendações feita pelo Governo do RS para garantir a resiliência climática das estruturas	23
4.3 Modelagem Hidrológica.....	26
4.4 Modelagem Hidráulica.....	30
5. RESULTADOS DO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO E BATIMÉTRICO.....	32
5.1 Registro de atividade de levantamento de dados em campo	32
5.2 Informações sobre o rio e seções transversais junto à ponte	36
6. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA PRECIPITAÇÃO E VAZÃO	43
6.1 Estatísticas dos dados pluviométricos.....	43
6.2 Determinação da precipitação de projeto conforme recomendações feita pelo Governo do RS para garantir a resiliência climática das infraestruturas.	45

7.	DETERMINAÇÃO DE VAZÃO DE PROJETO	46
7.1	Estimativa do tempo de concentração	46
7.2	Hietograma de projeto	48
7.3	Ajuste do modelo hidrológico	51
7.3.1	<i>Avaliação da adequabilidade do uso dos modelos Curva Número (CN) e do Hidrograma Unitário Triangular</i>	<i>51</i>
7.3.2	<i>Evento de calibração de 2024</i>	<i>53</i>
7.3.3	<i>Topologia de simulação.....</i>	<i>55</i>
7.3.4	<i>Calibração do parâmetro CN</i>	<i>55</i>
7.4	Vazão de projeto	57
8.	DETERMINAÇÃO DAS COTAS E VELOCIDADES DE PROJETO	59
8.1	Ajuste do modelo hidráulico.....	59
8.2	Simulação das vazões de projeto	65
9.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	70
10.	EQUIPE TÉCNICA.....	72
11.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

RESUMO EXECUTIVO

O estudo hidrológico apresentado neste relatório foi desenvolvido visando determinar a cota de cheia e velocidades a serem utilizadas como referência para o anteprojeto da ponte referente a Dispensa de Licitação nº 252/2024, no rio Jaguari na localidade de Passo da França no município de São Vicente do Sul. A área da bacia hidrográfica de contribuição até a ponte foi estimada em 4194 km². O estudo hidrológico desenvolvido nesse documento foi no nível de anteprojeto, com base na orientação de locação recebida sobre o anteprojeto da ponte, e deve ser complementado com os estudos hidrológicos detalhados conforme a 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) (IS-121/21) na ocasião de elaboração do projeto executivo. O protocolo metodológico consistiu na calibração de modelo hidrológico e hidráulico para a cheia observada no evento de Abril-Maio de 2024, com base em levantamento de campo, e utilização de parâmetros ajustados para a determinação das cotas de cheia e velocidades de escoamento para tempos de retorno de interesse. Foi estimada a cota da cheia de 85,70 m para a inundação ocorrida em Abril-Maio de 2024, valor semelhante aos 85,69 m para um evento de projeto com 100 anos de tempo de retorno, e 86,47 m para o evento com tempo de retorno de 350 anos. As velocidades médias do escoamento para as vazões observadas em Abril-Maio de 2024, evento de projeto de 100 anos e 350 anos de tempo de retorno foram, respectivamente, 2,62 m.s⁻¹, 2,61 m.s⁻¹ e 2,52 m.s⁻¹, considerando as seções transversais obtida na ocasião da realização deste estudo. Já na seção de montante observou-se velocidades superiores, chegando respectivamente a 3,84 m.s⁻¹, 3,46 m.s⁻¹ e 3.26 m.s⁻¹. Isso indica que, para o projeto dessa ponte, caso não forem seguidas as recomendações relativas às mudanças climáticas, com a incorporação do evento de 350 anos de tempo de retorno, devem ser utilizadas as informações relativas ao evento de Abril e Maio de 2024 para o projeto da ponte. Esse critério é consonante à nota do IPH, já que 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.

1. OBJETO

Este relatório refere-se à realização de estudo hidrológico para apoiar o desenvolvimento do anteprojeto para a reconstrução de Obras de Arte Especiais (OEA) - pontes que foram destruídas por desastre natural (chuvas de grandes proporções) ocorrido no dia 01/05/2024, que compõem a Dispensa de Licitação nº 252/2024 da Prefeitura do município de São Vicente do Sul, com Protocolo da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC): REC-RS-4319802-20240607-01.

2. INTRODUÇÃO

As enchentes ocorridas nos meses de Abril e Maio de 2024 tiveram impactos significativos de natureza social, ambiental e econômica em praticamente todo o Estado do Rio Grande do Sul. Até o momento da elaboração deste documento, pelo menos 185 pessoas de diferentes faixas etárias perderam a vida devido às enchentes, em decorrência de descargas elétricas, afogamentos e deslizamentos de terra. Além disso, mais de 2 milhões de pessoas foram diretamente afetadas pelas enchentes, cerca de 330 mil pessoas ficaram desalojadas e, aproximadamente, 80 mil pessoas foram alojadas temporariamente em abrigos.

As enchentes também causaram danos significativos à infraestrutura privada e pública. Bairros inteiros foram devastados pela força das águas, redes de água e esgoto foram destruídas, deixando quase um milhão de residências sem fornecimento de água, e mais de 160 mil unidades consumidoras ficaram sem energia elétrica. Além disso, várias rodovias federais, estaduais e municipais foram bloqueadas, pontes e pontilhões colapsaram, e houve bloqueio rodoviário em diferentes trechos também por problemas de instabilidade de encostas, deixando prejuízos de bilhões de reais em obras de infraestrutura em todo o estado do RS.

Em termos de infraestrutura, o Município de São Vicente do Sul teve sua ponte que interliga os municípios de São Vicente do Sul e São Francisco de Assis na localidade de Passo da França, totalmente colapsada. A Figura 1 apresenta a estrutura da ponte antes do evento hidrológico de 01/05/2024 e a Figura 2 após.

Para início da reconstrução, foi contratada, pelo regime de execução indireta, a elaboração de estudos técnicos e de anteprojetos de Engenharia para a reconstrução de Obras de Arte Especiais (OAE) - pontes destruídas pelo desastre natural (chuvas intensas) ocorrido em 01/05/2024.

Este relatório, descreve as atividades correspondentes ao ESTUDO HIDROLÓGICO PARA O DESENVOLVIMENTO DOS ANTEPROJETOS DE ENGENHARIA PARA A RECONSTRUÇÃO DE

PONTES que compõem a Dispensa de Licitação nº 252/2024, com Protocolo SEDEC: Protocolo REC-RS-4319802-20240607-01 em localização apresentada na Figura 1.

Figura 1 Imagem de Satélite da Ponte em Passo da França, sobre o Rio Jaguari, antes do seu colapso



Fonte: Google Earth

Figura 2 Ponte em Passo da França sobre o rio Jaguari após o evento de Abril-Maio de 2024.



Fonte: REC-RS-4319802-20240607-01

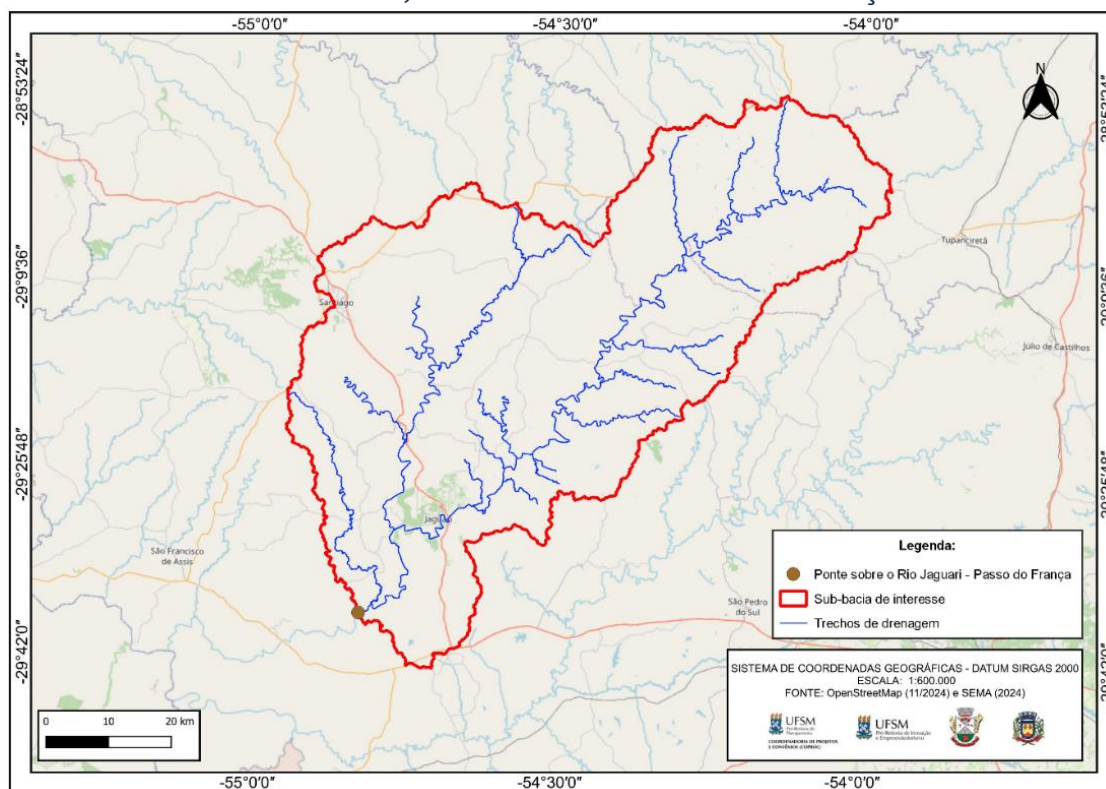
O estudo hidrológico é realizado em nível de anteprojeto, e foi realizado com base em recomendações da IS-121/21 INSTRUÇÃO DE SERVIÇO PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS HIDROLÓGICOS E PROJETOS DE DRENAGEM E DE OBRAS DE ARTE CORRENTES do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER) do Rio Grande do Sul.

3. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

3.1 Localização e clima

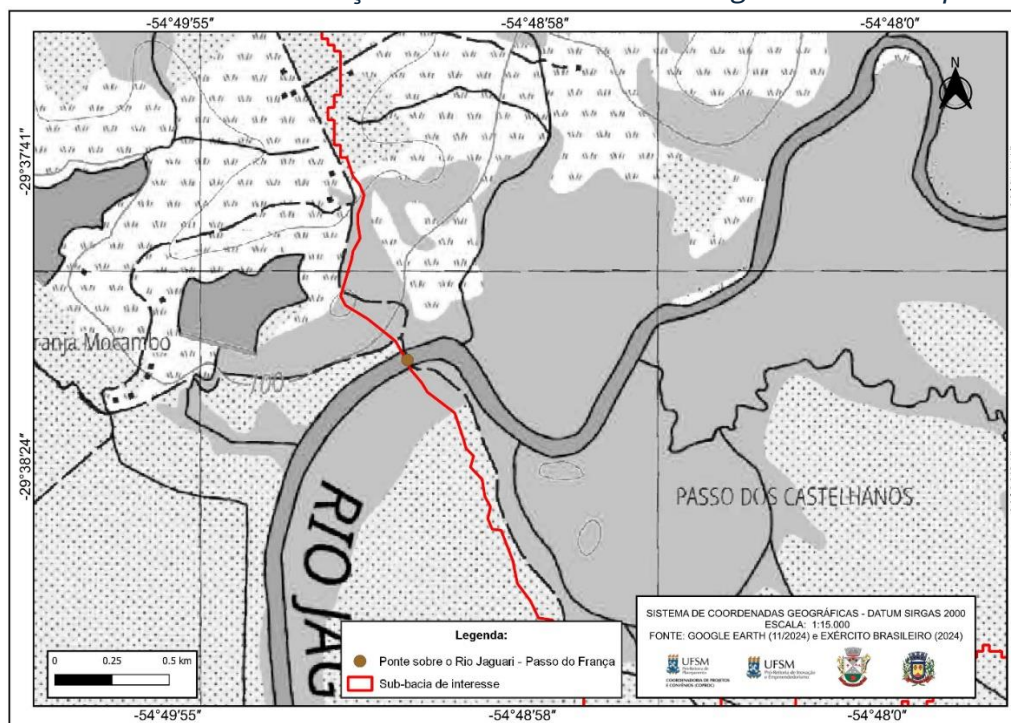
A ponte, objeto desse estudo, está localizada sobre o Rio Jaguari e está indicada na Figura 3, onde também se apresenta a delimitação da bacia hidrográfica no contexto regional. A bacia hidrográfica de contribuição a esta ponte totaliza 4194 km² e encontra-se em zona de transição de relevo. A região da ponte de Passo da França é uma área de várzea, com baixo gradiente topográfico, onde predominam os efeitos de armazenamento; já a região das nascentes desta bacia hidrográfica é extremamente declivosa, o que faz com que o escoamento atinja rapidamente esta região mais plana, provocando o espalhando para a planície, o que justifica a extensão das inundações de Abril-Maio de 2024. A Figura 4 ilustra a característica topográfica da região de jusante desta bacia hidrográfica junto à ponte de Passo da França.

Figura 3. Localização da ponte em Passo da França entre São Vicente do Sul e São Francisco de Assis, referente a DISPENSA DE LICITAÇÃO N° 252/2024.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Figura 4. Detalhe da região de várzea do rio Jaguar junto à ponte de Passo da França, que recebe a contribuição de diversos cursos de águas vindos do planalto.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Conforme discutido em mais detalhes na seção de metodologia, a região de várzea impôs desafios iniciais no processo de delimitação da bacia hidrográfica junto a esta região, devido à topografia plana, e à ausência de informações topográficas de qualidade. Para superar esse problema, foi empregada uma combinação de tecnologias, incluindo levantamento com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs ou drones), sensoriamento remoto e medições em solo com GPS de precisão (GNSS). Essa abordagem permitiu uma delimitação preliminar da bacia, que foi posteriormente refinada com visitas in loco.

Em relação à caracterização climática, a região onde encontra-se a bacia hidrográfica, possui clima 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 varia entre 17°C e 20°C, sendo a temperatura média do mês mais quente superior a 24°C, sendo que já foram registradas temperaturas máximas de até 40°C no verão, e mínimas de 0°C durante o inverno (Tabela 1). As estações são bem definidas, principalmente entre inverno e verão, e a precipitação média anual na faixa de 1.500 a 1.700

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.

Tabela 1 Normais climatológicas (1991-2020) para a região do município de São Vicente do Sul/RS.

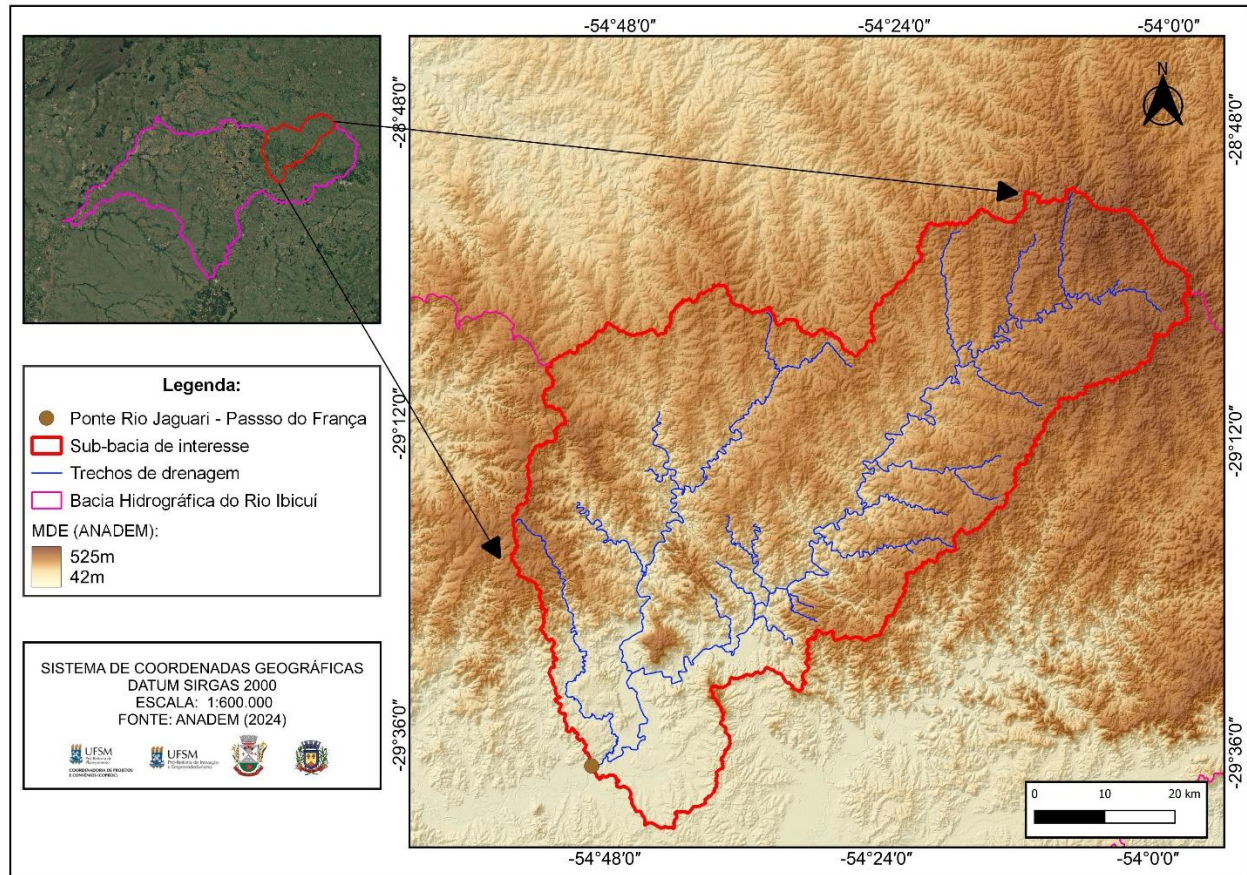
Mês	Minima (°C)	Máxima (°C)	Precipitação (mm)
Janeiro	21	30	145
Fevereiro	20	29	128
Março	19	28	117
Abril	16	25	144
Mai	12	21	119
Junho	11	19	126
Julho	10	18	126
Agosto	11	21	115
Setembro	12	22	145
Outubro	15	24	200
Novembro	16	27	130
Dezembro	19	30	126

FONTE: ClimaTempo

3.2 Relevo, geomorfologia e pedologia

O relevo da bacia do rio Jaguari na área de contribuição à ponte em Passo da França possui uma significativa variação de cotas altimétricas, com valores variando de 535 m a aproximadamente 75 m na região junto à ponte (Figura 5). Essa condição topográfica, conjuntamente com um formato alongado da bacia hidrográfica, contribui para que os principais afluentes do rio Jaguari tenham respostas rápidas a eventos de precipitação, assim, a montante da ponte há aumento significativo de vazão que se propaga para a região mais plana na várzea, onde passa a atuar com efeitos preponderantes de armazenamento.

Figura 5. Relevo da bacia hidrográfica do rio Jaguari delimitada até a ponte de Passo da França.

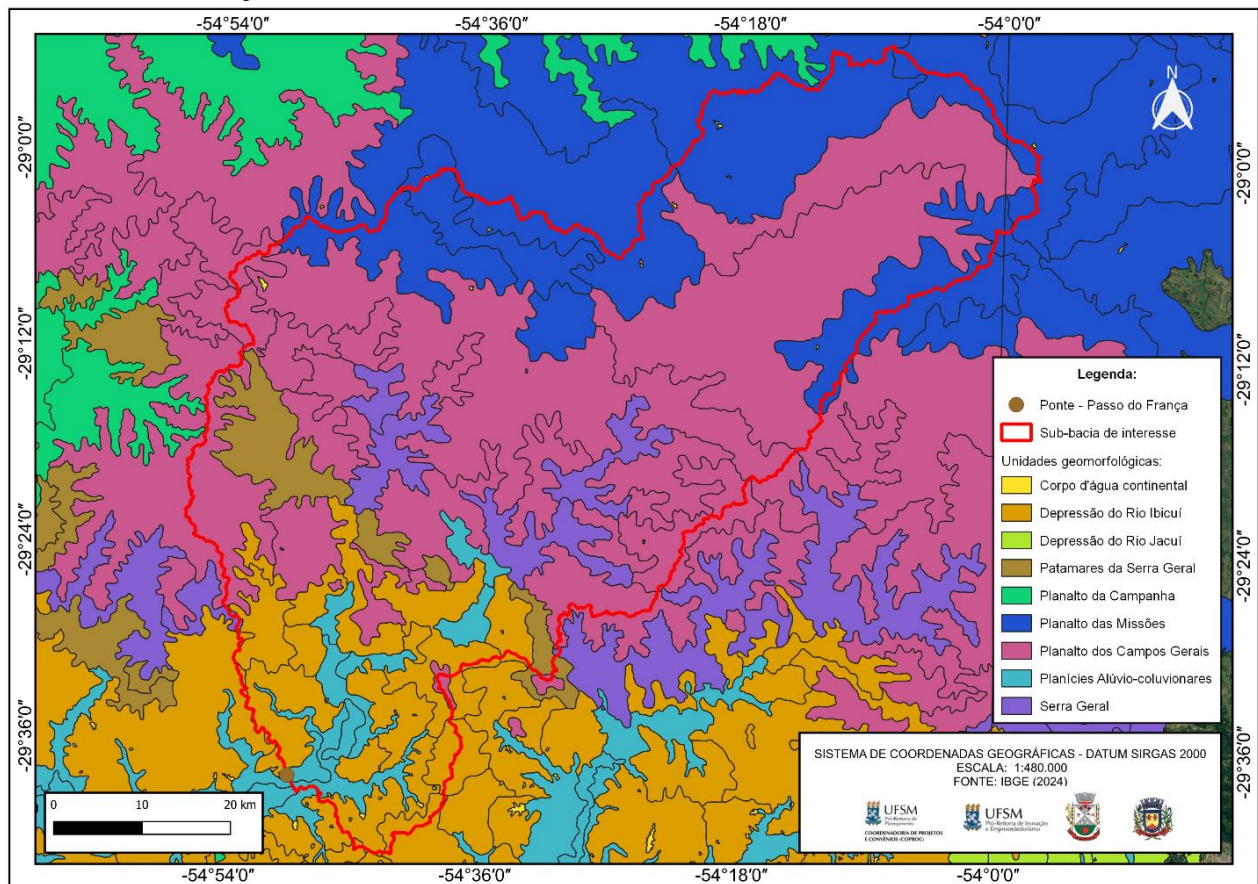


FONTE: elaborado pelos autores com base em ANADEM (Laipeld et al., 2024)

Em relação à geomorfologia, a bacia hidrográfica possui uma combinação de formações geomorfológicas, conforme demonstrado na Figura 6. Na região das cabeceiras da bacia hidrográfica estão presentes as formações do Planalto das Missões, do Planalto dos Campos Gerais e Serra Geral, locais que possuem cotas altimétricas elevadas e regiões com altas declividades. Nestas formações o relevo é levemente ondulado junto às nascentes dos principais cursos d'água, passando para um relevo mais ondulado com associação de morros, morrotes e colinas (Robaina et al., 2010). Os cursos d'água apresentam um padrão retangular de drenagem, controlado pelas estruturas geológicas. As litologias predominantes são constituídas por derrames de rochas vulcânicas ácidas e básicas da Formação Serra Geral. Já em região mais a jusante, próxima ao exutório da bacia hidrográfica deste estudo, predominam as subunidades geomorfológicas da depressão do

Rio Ibicuí e as Planícies Alúvio-Coluvionares, que apresentam processos geomorfológicos equilibrados pela drenagem do rio Jaguari e suas vertentes. Atuam nessas formações rochas sedimentares de diferentes tipos, porém a que predomina é o arenito. Já nas áreas aluviais, apresenta-se planícies com características de depósitos sedimentares de canal, favorecendo os processos de deposição de sedimentos (Robaina, et al.,2010).

Figura 6. Unidades geomorfológicas da bacia do rio Jaguari, delimitada até a ponte de Passo da França.

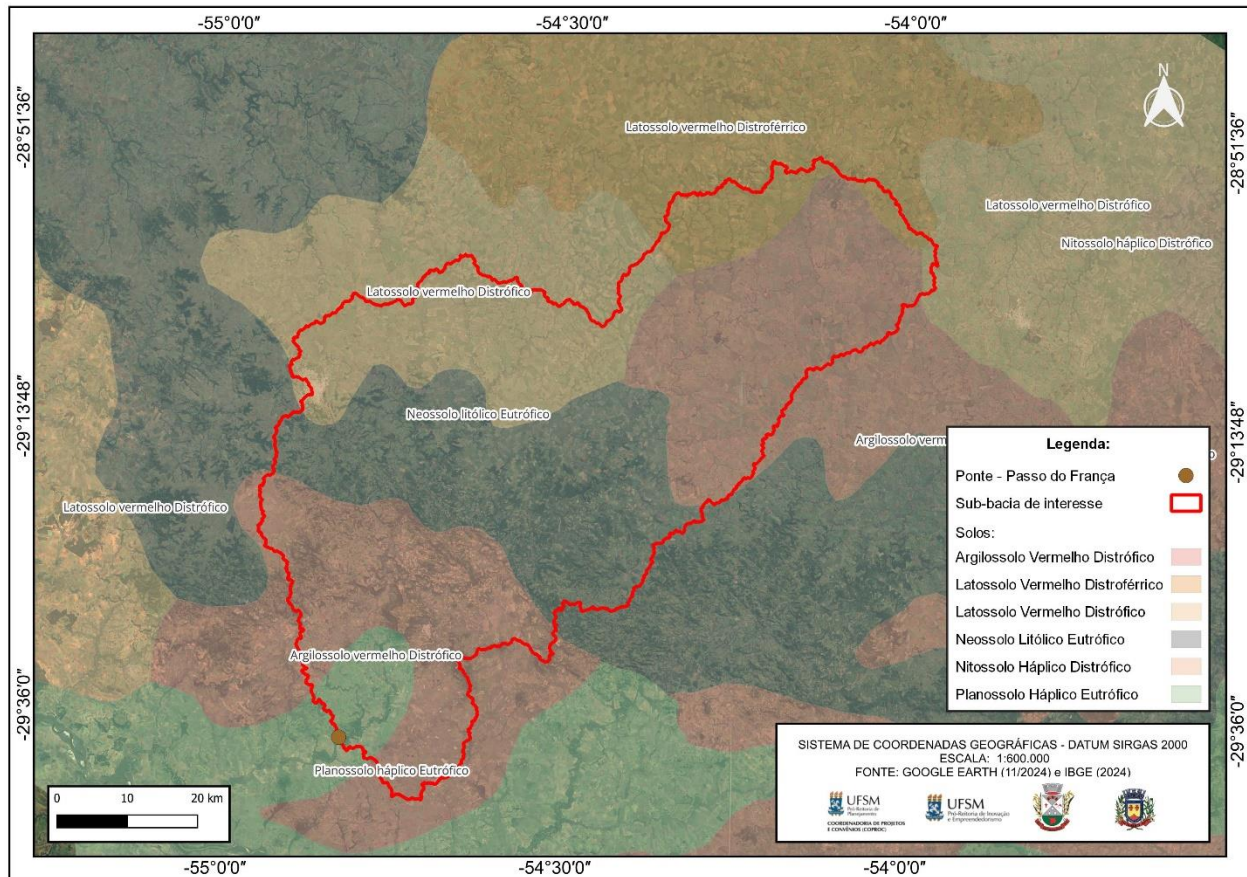


FONTE: Adaptado do Projeto RADAMBRASIL (1986)

Em relação aos solos presentes na bacia hidrográfica, na região da cabeceira existe predomínio dos solos Argissolo Vermelho Distrófico, Latossolo Vermelho Distrófico e Latossolo Vermelho Distroférrico (Figura 7). Na região mediana da bacia é encontrado o solo Neossolo Litólico Eutrófico, e na região do seu exutório o Planossolo Háplico Distrófico. Observa-se que a bacia se encontra em uma zona de transição entre diferentes tipos de

solos, isto está diretamente relacionado com a transição das formações geomorfológicas presentes na bacia.

Figura 7. Distribuição dos solos na bacia hidrográfica do rio Jaguari, delimitada até a ponte de Passo da França.



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

Os Argissolos, antigamente classificados como Podzólicos Vermelho-Oscuros, são solos constituídos por material mineral, que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural de argila de atividade baixa, ou alta conjugada com saturação por bases baixas ou caráter alético. O horizonte B textural (Bt) encontra-se imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial, exceto o hístico, sem apresentar, contudo, os requisitos estabelecidos para serem enquadrados nas classes dos Luvisolos, Planossolos, Plintossolos ou Gleissolos.

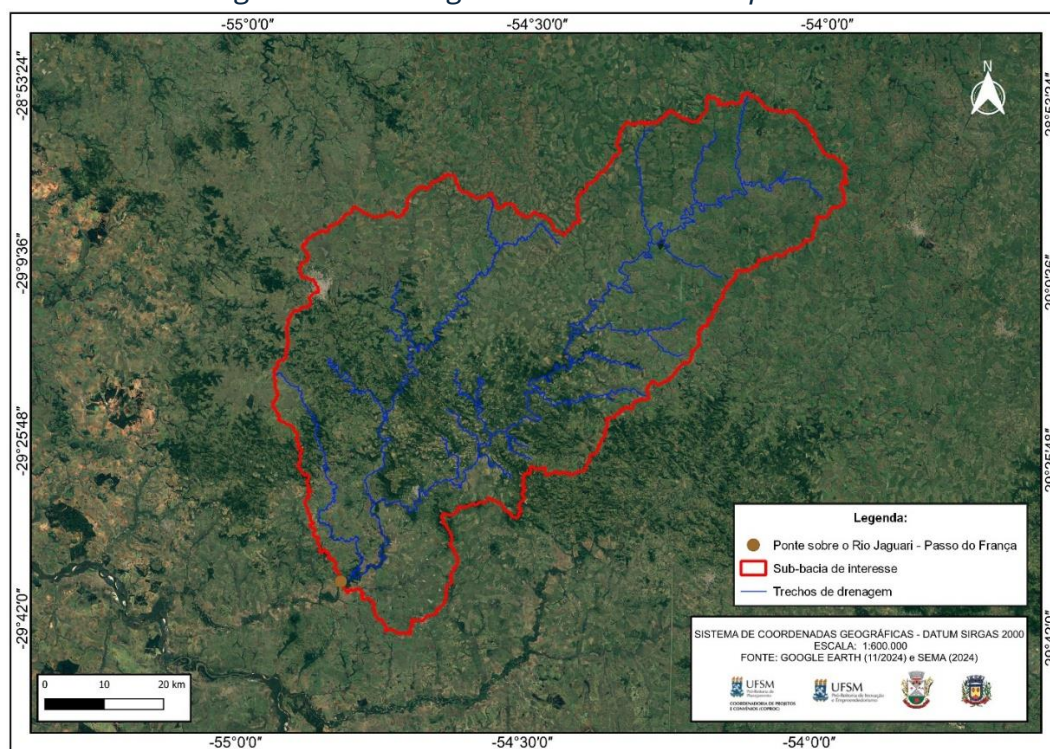
Os Latossolos Vermelhos Distroféricos são derivados de rochas básicas, conhecidos anteriormente como Latossolos roxos por sua cor característica e são muito profundos, argilosos ou muito argilosos e de boas condições físicas. Já os Latossolos Vermelhos Distróficos são solos minerais com teores médios a altos de ferro, conhecidos anteriormente como Latossolos vermelho-escuro. Possuem textura argilosa, muito argilosa ou média. Suas condições físicas aliadas ao relevo plano ou suavemente ondulado favorecem sua utilização para a agricultura. Os de textura média são mais pobres e podem ser degradados facilmente por compactação e erosão. Já o Neossolos Litólicos (solos litólicos), presentes na região mediana da bacia, são solos com contato lítico dentro de 50 cm e estão normalmente associados aos afloramentos de rochas, com sequência de horizontes A-C-R, A-R, conforme definido pelo SiBCS (EMBRAPA, 2006). Segundo Alho et al. (2007) devido a este fato, áreas com ocorrência desses solos apresentam restrições à ocupação antrópica, estando geralmente relacionados aos basaltos e arenitos. As características morfológicas desses solos se restringem praticamente às do horizonte A, o qual varia, em média, de 0,15 a 0,40 m de espessura, sendo que a cor, textura, estrutura e consistência, dependem do tipo de material que deu origem ao solo (Silva & Silva, 1997b); além disso, são bastante heterogêneos no que se refere aos atributos físicos, químicos e mineralógicos (Bognola et al. 2002), possuindo uma característica moderada a alta de erodibilidade (Silva & Silva, 1997a; Margolis et al., 1985) principalmente por normalmente, serem arenosos, e apresentarem fragmentos de rochas e cascalhos em seu corpo ou na sua superfície estando associados aos relevos ondulado e fortemente ondulado, com declividades acentuadas (Silva & Silva, 1985).

Já os Planossolos, presentes na região próxima ao exutório da bacia hidrográfica, possuem elevado status nutricional, mas com sérias limitações de ordem física relacionadas ao adensamento, sendo muito susceptíveis à erosão. Possuem textura arenosa da superfície até mais de 100 cm da superfície e horizonte glei (tabatinga) dentro de 200 cm da superfície, indicando má drenagem (EMBRAPA, 2006).

3.3 Uso e ocupação do solo

A Figura 8 apresenta a delimitação da bacia hidrográfica do rio Jaguari até a ponte de Passo da França sobreposta em imagem de satélite onde é possível verificar os padrões de cobertura do solo na região.

Figura 8. Bacia hidrográfica do rio Jaguari delimitada até a ponte de Passo da França.



Fonte: Autores.

A classificação de uso e ocupação da bacia através do MapBiomas (2023) indica que atualmente predominam áreas destinadas ao plantio de soja, em aproximadamente 42,20% da área (Tabela 2 e Figura 9). O plantio da soja na modalidade plantio direto, faz com que não seja necessário a movimentação do solo com equipamentos como arados, favorecendo a diminuição da erosão e da concentração de sedimentos nos cursos d'água, contudo, com o passar dos anos, esta modalidade de plantio faz com que o solo tenha uma certa compactação, fazendo que num evento de precipitação ele atinja seu potencial de saturação rapidamente favorecendo a geração de escoamento superficial. A formação campestre vem em seguida na classificação dos usos da bacia, em cerca de 28,80%

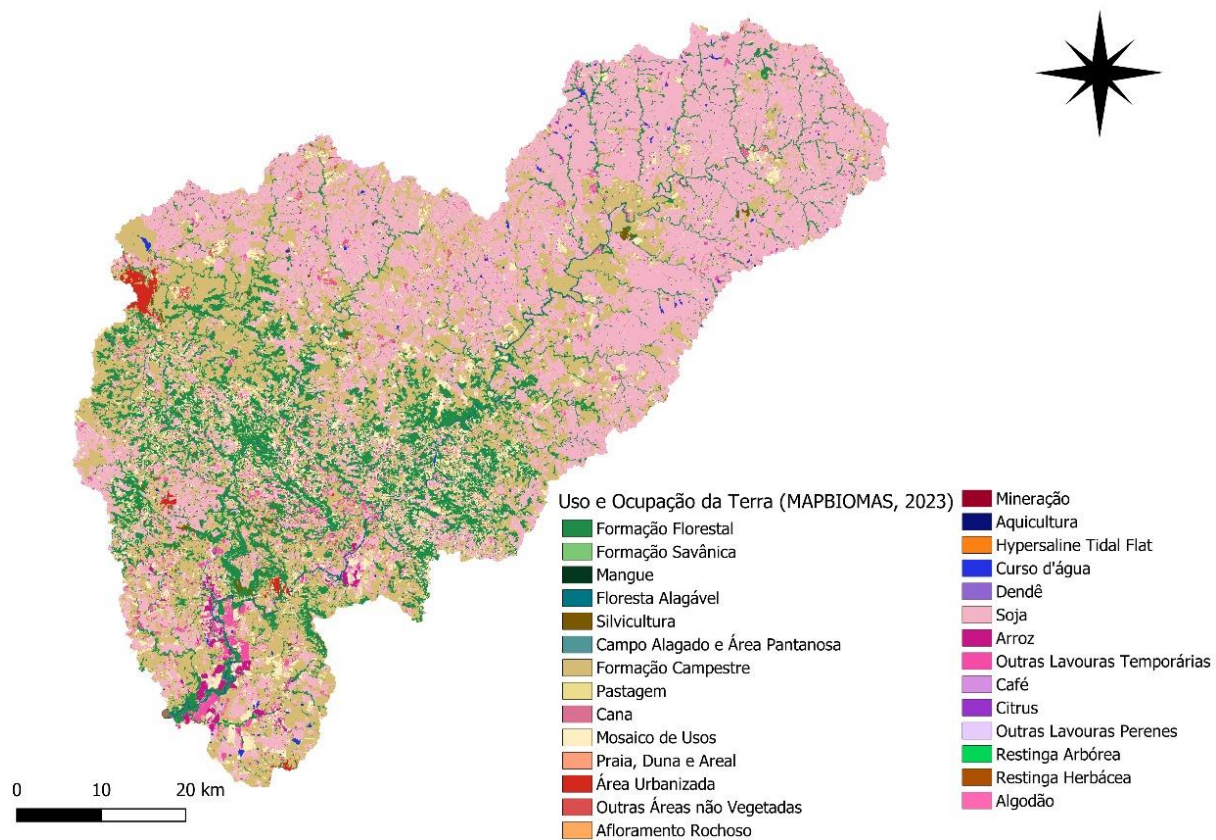
(predomínio de estrato herbáceo graminóide, com presença de dicotiledôneas herbáceas e subarbustivas). A composição botânica é influenciada pelos gradientes edáficos e topográficos e pelo manejo pastoril (pecuária). Este uso ocorre em solos profundos até solos rasos, incluindo terrenos rochosos (campos rupestres) e arenosos (campos arenosos ou psamófilos). Ocupam desde solos bem drenados (campos mésicos), até solos com Maior teor de umidade (campos úmidos - com presença marcante de ciperáceas). Na Maioria dos casos corresponde à vegetação nativa, mas podem estar presentes manchas de vegetação exótica invasora ou de uso forrageiro (pastagem plantada). Já a terceira Maior ocupação do solo com 15,30% da área é por formação florestal 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.

Tabela 2. Proporção do Uso e Ocupação do Solo na bacia hidrográfica do rio Jaguari, delimitada até a ponte do passo da França.

Classes de cobertura e uso do solo	Área ocupada (Km²)	% na bacia
Formação Florestal	6,42	15,30
Silvicultura	0,17	0,40
Campo Alagado e Área Pantanosa	0,04	0,10
Formação Campestre	12,08	28,80
Pastagem	0,29	0,7
Mosaico de Usos	3,36	8,0
Área Urbanizada	0,17	0,40
Outras Áreas não-vegetadas	0,08	0,20
Curso d'água	0,25	0,60
Soja	17,70	42,20
Arroz	0,17	0,4
Outras Lavouras Temporárias	1,22	2,90

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

Figura 9. Distribuição do Uso e Ocupação do Solo na bacia hidrográfica do rio Jaguari, delimitada até a ponte do passo da França.



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

4. METODOLOGIA

O presente item define e especifica os serviços desenvolvidos para o estudo hidrológico e hidráulico, em nível de anteprojeto, com vistas a verificar e/ou determinar a altura e comprimento da ponte que compõem a Dispensa de Licitação nº 252/2024, com Protocolo da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC): REC-RS-4319802-20240607-01. Este estudo hidrológico foi realizado com base em 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.

Como será apresentado no item 6, não há monitoramento de vazão junto ao local de implementação da ponte que permita a análise de vazões e sua associação com o período de recorrência a ser utilizado nas análises. Foi identificado, no entanto, o posto Passo do Loreto (76.490.000) em seção do rio Jaguari, cerca de 15 km a jusante do local de implementação da ponte. A série disponível nesse posto corresponde ao período de 1955 a 1985, portanto, não conta com período recente, não sendo recomendado o seu uso para análises estatísticas de cotas de cheia, embora haja o registro da cheia histórica de 1984. Por outro lado, foram encontrados 4 postos pluviométricos de base diária com boa representatividade espacial na bacia hidrográfica, com séries que compreendem o período de 1983 a Junho de 2024, ou seja, postos de precipitação que registraram os eventos de chuva das cheias históricas de 1984 e 2024. Dessa forma, o protocolo seguiu a orientação da IS-121/21 com aplicação de modelagem chuva-vazão na seção de interesse, tomando como base a calibração de parâmetros hidrológicos para a seção onde existe monitoramento fluviométrico, e a transferência de parametrização. Os detalhes dessa análise serão apresentados no item sobre ajuste do modelo hidrológico.

4.1.2 Dados topobatimétricos

O levantamento topográfico e batimétrico da calha do rio em cada uma das pontes foi realizado com base na IS-121/21, considerando os principais pontos da metodologia da IS-212/21 utilizada como base no levantamento que incluem:

- a) Identificação do nome do curso d'água, nome ou nº da estrada, trecho ou subtrecho, assim como o norte geográfico em relação ao eixo do curso d'água;*
- b) Levantamento topográfico da calha do rio, definindo local do canal de navegação (caso exista);*

- c) Levantamento batimétrico no eixo geométrico ou na lateral da ponte existente, caso exista numa extensão de 1,50m para cada lado da margem do rio. No caso de várzea, nivelar o eixo e a paralela 10m, lado direito ou esquerdo;*
- d) Cota do nível d'água medida num mesmo dia em todas as seções transversais, devidamente e datadas;*
- e) Cota do nível da cheia máxima observada, datada e com nome do informante (cheia máxima observada da própria ou de refluxo – represamento);*
- f) Localização em planta do RN utilizado;*
- g) Linhas paralelas à montante e à jusante da linha do eixo nas distâncias de 10, 30, 50 ou 20, 40, 60 ou 40, 100, 150, conforme o caso, (o que irá definir é o porte do rio e/ou o comprimento da ponte).*
- h) Identificar, em todas as seções, as margens do rio bem como as cotas de pé e topo de talude;*
- i) Amarrar todas as cotas a RNs do SGE;*
- j) No sentido transversal ao rio, nivelar as seções em 100 m para cada lado da margem com pontos de 10 em 10 assinalando pontos notáveis, ou seja, pequenos córregos que possam ocorrer;*
- k) Escondidade do eixo do curso d'água;*
- l) Tipo de solo nas margens e no fundo do rio;*
- m) Tonalidade (cor) da água do rio;*
- n) Descrição do tipo da vegetação nas margens do rio;*
- o) Descrição do subleito dos taludes e fundo do rio;*
- p) Medição da velocidade entre os pontos mais afastados do plano cotado (normais), medida 3 (três) vezes:*

q) Croqui da ponte ou pontilhão existente, contendo dados como comprimento, largura, altura, material de que é feito, pilares, estado, etc.;

r) Sempre que for possível filmar a ponte existente, assim como o rio e detalhes como tipo de solo, vegetação, etc.

Conforme já mencionado, para atender os requerimentos da IS121/21 listados acima e, abranger a área afetada, foi realizado o levantamento topográfico a partir da combinação de Veículos Aéreos Não tripulados (VANTs ou drones), sensoramento remoto, e medidas no solo como estações total, GNSS e outros equipamentos. A utilização de VANTs específicos para levantamentos topográficos permite obter precisão centimétrica, utilização de tecnologia de ponta para garantir alta precisão nos dados coletados com alta eficiência e rapidez, obtendo assim uma redução significativa do tempo de levantamento em comparação com métodos tradicionais.

Ainda, o uso de drones permite o acesso a áreas de difícil acesso, desenvolvendo assim a capacidade de mapear áreas que seriam inacessíveis ou perigosas para equipes terrestres. Vale destacar que, em função do tempo disponível, o levantamento foi amarrado no levantamento topográfico prévio fornecido pela equipe que está desenvolvendo o estudo do projeto estrutural da ponte, e em levantamento de pontos utilizando GNSS no local.

A metodologia do levantamento com o drone foi dividida em diferentes etapas, que iniciou pelo planejamento do voo e implantação de pontos de controle, e terminou com a elaboração dos produtos correspondentes. Abaixo são descritas as etapas realizadas.

- Planejamento do Voo: Definição da área a ser mapeada e planejamento da rota do drone.

- Implantação dos Pontos de Controle: Estabelecimento de pontos de controle no terreno para garantir a precisão dos dados coletados. Nesse caso, foi escolhido um ponto de controle fixo no local.

- Captura de Imagens e Dados: O drone realizou voos sobre a área definida, capturando imagens e dados topográficos detalhados.

- **Processamento e Análise:** As imagens e dados coletados foram processados, combinados digitalmente com dados obtidos por sensores orbitais, dados de GNSS e outras informações para gerar modelos digitais de superfície (MDS) e terreno (MDT), além de curvas de nível e ortomosaicos.

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 as recomendações feita 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 pontes, pois garante Maior confiabilidade e segurança nas obras. Uma vez que não foram encontrados dados fluviométricos medidos no local de implantação da ponte, 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).

4.2.2 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 10).

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.

Figura 10. 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** e 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

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 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. Percentagens 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 (anos)	TR (anos) a ser adotado em função da área de drenagem da bacia (A)	
	A < 1000 km²	A > 1000 km²
2	3	3
5	12	10
10	25	20
25	75	60
50	200	150
100	450	350
200	1000	800
500	3500	2500
1000	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 350 anos, em razão da bacia hidrográfica em estudo possuir área superior a 1000 Km².

4.3 Modelagem Hidrológica

Devido à falta de monitoramento fluviométrico no Rio Jaguari em seção junto ao local de instalação da ponte, foi empregada a modelagem hidrológica de transformação chuva-vazão. A IS-121/21 recomenda que para bacias com áreas Maiores do que 10 km² e menores que 2500 km² seja empregada a metodologia da Curva Número (CN) do Natural Resource 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 propagação do escoamento superficial na bacia hidrográfica. A bacia hidrográfica em estudo possui área superior ao valor recomendado; assim, diante da inexistência de outra metodologia recomendada na mesma IS, procedeu-se com uma etapa inicial de verificação de viabilidade de aplicação desta metodologia. Os detalhes sobre esse procedimento são descritos no item Ajuste do modelo hidrológico.

O modelo da Curva Número (CN) utiliza a equação 1 para a separação do escoamento, válida para $P > 0,2 S$, 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 11). Para sua determinação são determinadas as componentes do triângulo, a partir da sequência de equações 3 a 5.

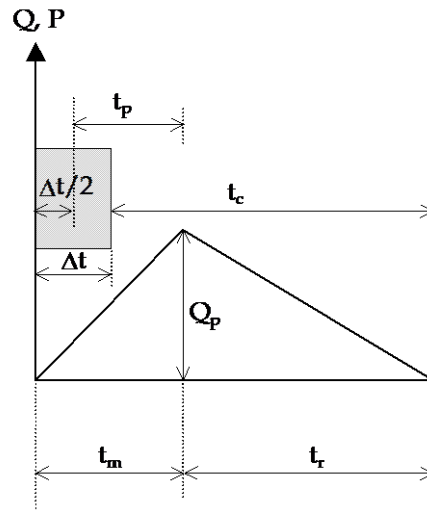
Tabela 5. Valores de CN para áreas urbanas e suburbanas.

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			
1000	38			
1300	30			
2000	25			
4000	20			
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 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 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 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 legumes ou 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 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 11 Hidrograma unitário triangular do SCS.



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

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

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

sendo: Δt é o intervalo de tempo de simulação, obtido a partir da precipitação; t_c é o tempo de concentração da bacia; Q_p a vazão máxima do hidrograma triangular em m^3/s ; A a área da bacia em km^2 . O intervalo de tempo é definido em unidades de t_m , sendo recomendado $\Delta t = t_m/5$.

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 (m^3/s); H o número de ordenadas do hidrograma unitário ($m^3/s/mm$); P_{ef} são os valores de precipitação efetiva no intervalo de tempo (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.

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 ponte, como o eventual efeito de represamento provocado pela ponte, 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 nos itens anteriores, incluindo seções e 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. RESULTADOS DO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO E BATIMÉTRICO

5.1 Registro de atividade de levantamento de dados em campo

Como mencionado na metodologia, foi realizado o levantamento topográfico com a utilização de VANT acoplado a outras informações. Em relação ao planejamento de voo, ele foi conduzido em duas etapas: uma em seção transversal ao rio e outra cobrindo uma área retangular nos arredores. O plano de voo foi elaborado utilizando o software Drone Deploy, com sobreposição frontal e lateral de 75%. O equipamento utilizado foi uma câmera modelo FC6310, com resolução de 4864 x 3648 pixels e distância focal de 8,8 mm. A resolução obtida foi de 3,65 cm/pixel, garantindo alta precisão nos detalhes do terreno (Figura 12).

O processamento de imagens foi realizado pelo software WEB Open Drone Map (WebODM) do projeto OpenDroneMap utilizando como pontos de controle levantamento topográfico fornecido pela equipe que está desenvolvendo o anteprojeto da ponte, obtendo assim, o Modelo Digital de Elevação (MDE) da região (Figura 13).

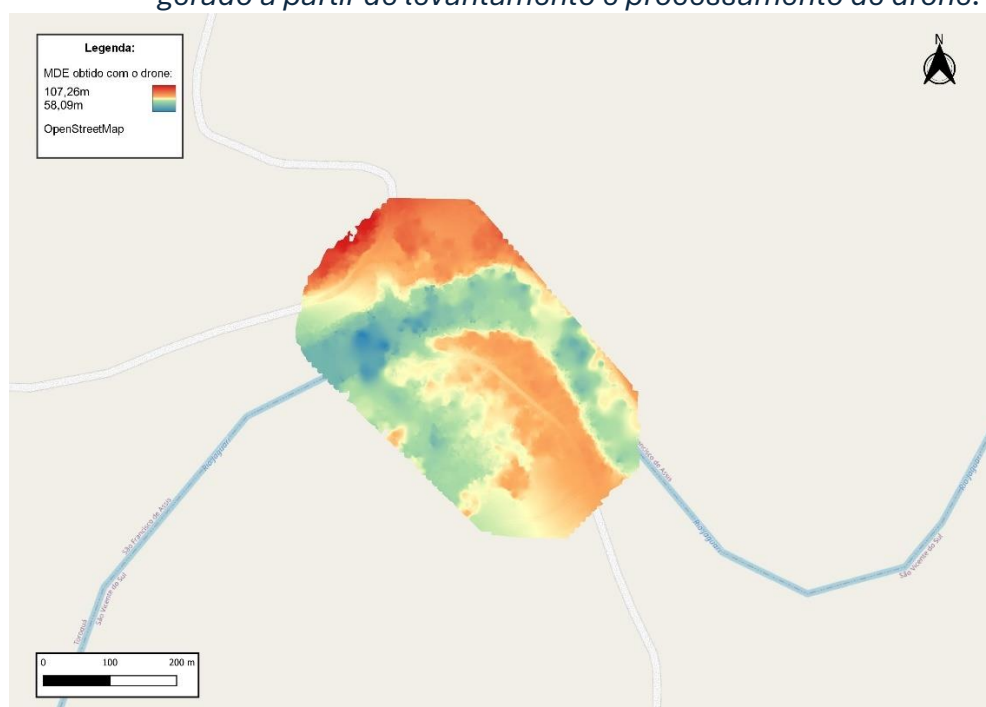
As informações do VANT foram também utilizadas para compatibilizar o relevo da bacia, obtido do Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS PALSAR, com resolução espacial (pixel) de 12,5 metros, disponível no site <https://search.asf.alaska.edu/> (JAXA, 2015), ANADEM (Laipeld et al 2024) com resolução de 20 m e MDE com detalhes compatíveis com uma resolução espacial (pixel) de 30 metros no solo do Projeto Brasil em Relevo (Miranda, 2024). O GNSS utilizado foi o GPS TOPCON GR-3 da marca TOPCON que possui tecnologia RTK (Real-Time Kinematic), esta tecnologia trabalha com a combinação de dois receptores, um atuando como base, fixo em um ponto coletando a informação específica deste ponto e outro receptor (ROVER) utilizado para realizar o levantamento topográfico e que fica constantemente conectado via rádio a base. Esta conexão entre os dois equipamentos realiza a correção instantânea de posicionamento e altimetria das informações coletadas pelo ROVER. Estes equipamentos funcionam com três sistemas de posicionamento GNSS (GPS, GLONASS e Galileo) garantindo precisão milimétrica.

Figura 12. Ortomosaico da região da ponte do Passo da França, obtido a partir do levantamento feito com o VANT na região da ponte na escala aproximada 1:3000.



FONTE: elaborado pelos autores com base em imagens de drone.

Figura 13. Modelo Digital de Elevação (MDE) da região da ponte do Passo da França, gerado a partir de levantamento e processamento de drone.



FONTE: elaborado pelos autores com base em imagens de drone.

O levantamento topográfico da calha do rio, ou seja, o levantamento batimétrico foi realizado com a utilização um ADCP (do inglês, Acoustic Doppler Current Profiler) modelo S15 da marca Sontek, que é um perfilador hidroacústico de correntes, que mede a velocidade de partículas na coluna de água a partir de um princípio físico de propagação de ondas sonoras conhecido como efeito Doppler.

Este equipamento também realiza o rastreamento do fundo do rio como parte de um levantamento hidrográfico. Esse tipo de equipamento é capaz de obter perfis de velocidade de correntes em toda a coluna de água ou em apenas uma faixa específica de profundidades. O ADCP foi combinado com informações de alta precisão de Global Navigation Satellite System (GNSS) para um mapeamento preciso do fundo. A aquisição automática de dados proporciona uma Maior eficiência nos levantamentos e não necessita da interferência do homem. A Figura 14 mostra um dos levantamentos batimétricos realizados com o equipamento ADCP.

Na Figura 15 se observa a localização das seções transversais levantadas e o alinhamento em relação ao local da ponte existente, enquanto que na Figura 16 se observa a vista a montante do local das seções e na Figura 17 a jusante. Essas imagens mostram as condições de rugosidade do canal e margens do rio, bem como as condições de escoamento a montante e a jusante da ponte.

Figura 14. Imagem captada durante a batimetria da região da ponte do Passo da França, com o ADCP em conjunto com a aquisição de dados do GNSS.



Figura 15. Localização das seções transversais da região da ponte do Passo da França, levantadas para o estudo hidrológico.



FONTE: elaborado pelos autores com base em imagens de drone.

Figura 16. Vista de jusante para montante da seção transversal do rio Jaguari da região da ponte do Passo da França. A fotografia foi tomada desde o eixo da localização da ponte danificada no dia do levantamento topobatimétrico.



Figura 17. Vista de montante para jusante da seção transversal do rio Jaguari da região da ponte do Passo da França. A fotografia foi tomada desde o eixo da localização da ponte danificada no dia do levantamento topobatimétrico.



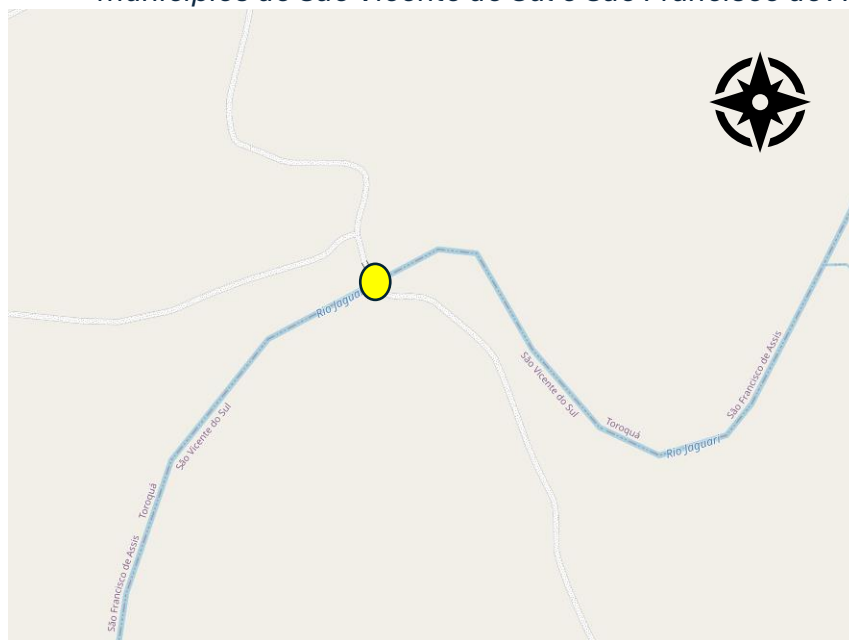
5.2 Informações sobre o rio e seções transversais junto à ponte

A seguir se indicam as informações do levantamento topobatimétrico, conforme requeridas pela IS-121/21:

a) Nome do curso d'água, nome ou n° da estrada, trecho ou sub-trecho, assim como o norte geográfico em relação ao eixo do curso d'água;

A ponte está situada no interior do município de São Vicente do Sul no limite territorial com o município de São Francisco de Assis, interligando os dois municípios. A ponte costuma ser referida também como Ponte do Passo da França (Figura 18). O norte geográfico em relação ao eixo do curso d'água está orientado a 45° graus (45° em direção Leste), sendo que o norte corresponde a 0° conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18. Localização da ponte de Passo da França (em amarelo), na divisa dos municípios de São Vicente do Sul e São Francisco de Assis



Fonte: Adaptado de OpenStreetMaps.

b) Levantamento topográfico da calha do rio, definindo local do canal de navegação (caso exista);

O levantamento topobatimétrico do rio Jaguari foi realizado em 30 de outubro de 2024. Na ocasião não foi identificada a presença de um canal de navegação, uma vez que o rio não é utilizado para esse propósito. O levantamento topobatimétrico foi realizado conforme ilustrado na Figura 14 e os resultados são apresentadas nos itens seguintes.

c) Levantamento batimétrico no eixo geométrico ou na lateral da ponte existente, caso exista numa extensão de 1,50m para cada lado da margem do rio. No caso de várzea, nivelar o eixo e a paralela 10m, lado direito ou esquerdo;

Devido à existência de detritos da própria ponte destruída, de pedras, e de dificuldades de acesso, entre outros elementos que causaram obstrução, especialmente a jusante, as seções foram levantadas ligeiramente deslocadas dos requerimentos da IS212/2 (Figura 15), mas sem comprometer a qualidade do levantamento desse trabalho.

Nas figuras a seguir são apresentadas as seções transversais levantadas a montante (Figura 19), no eixo (Figura 20) e a jusante (Figura 21) da ponte, apresentadas juntamente com a indicação da cota do nível d'água na data do levantamento, e a indicação da cota de cheia observada em Abril-Maio de 2024.

Figura 19. Seção transversal do rio Jaguari a montante da ponte do Passo da França.

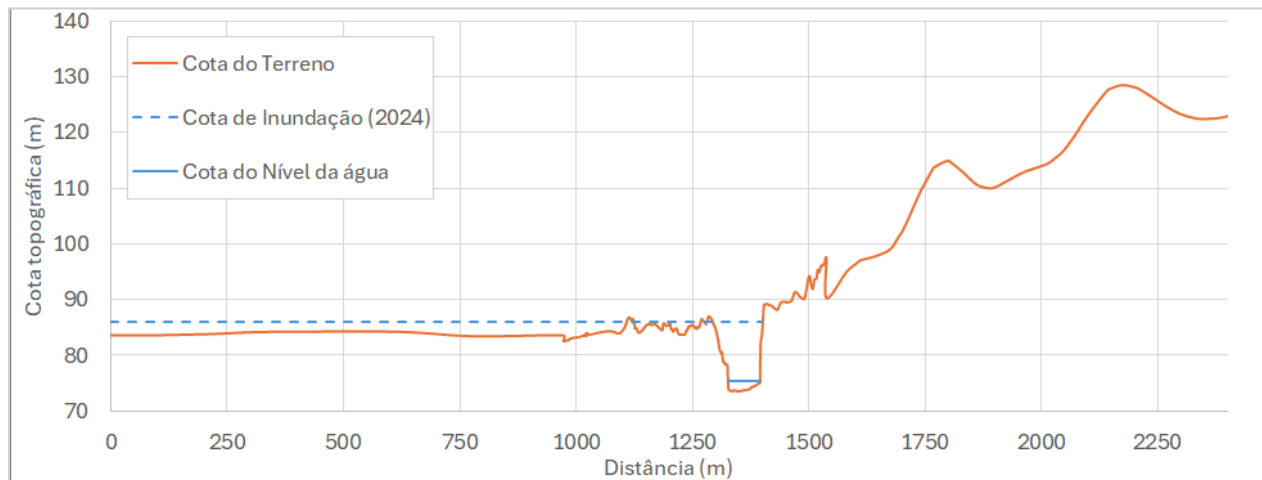


Figura 20. Seção transversal do rio Jaguari no eixo da ponte do Passo da França

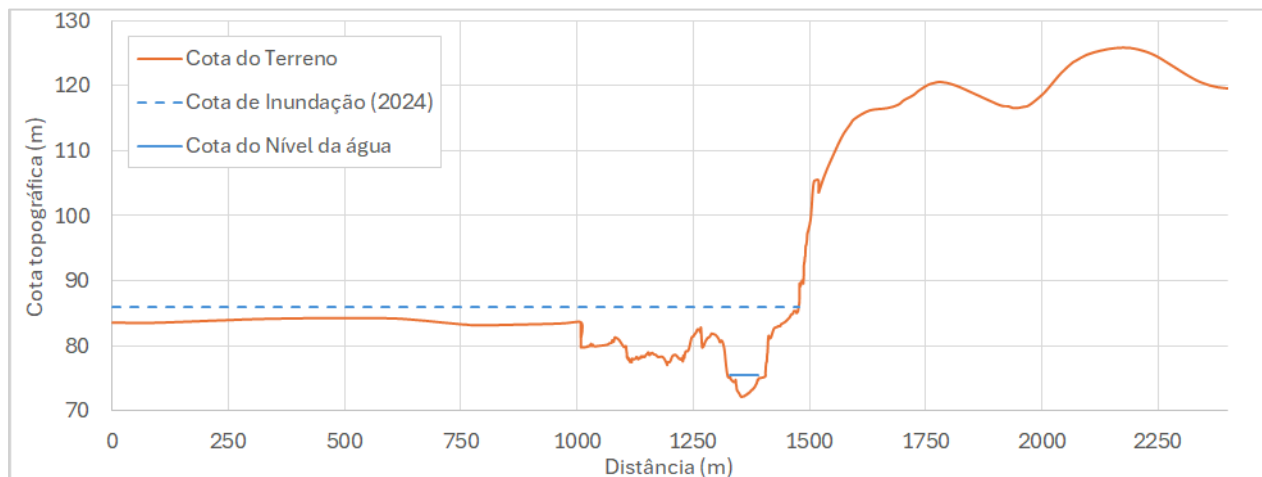
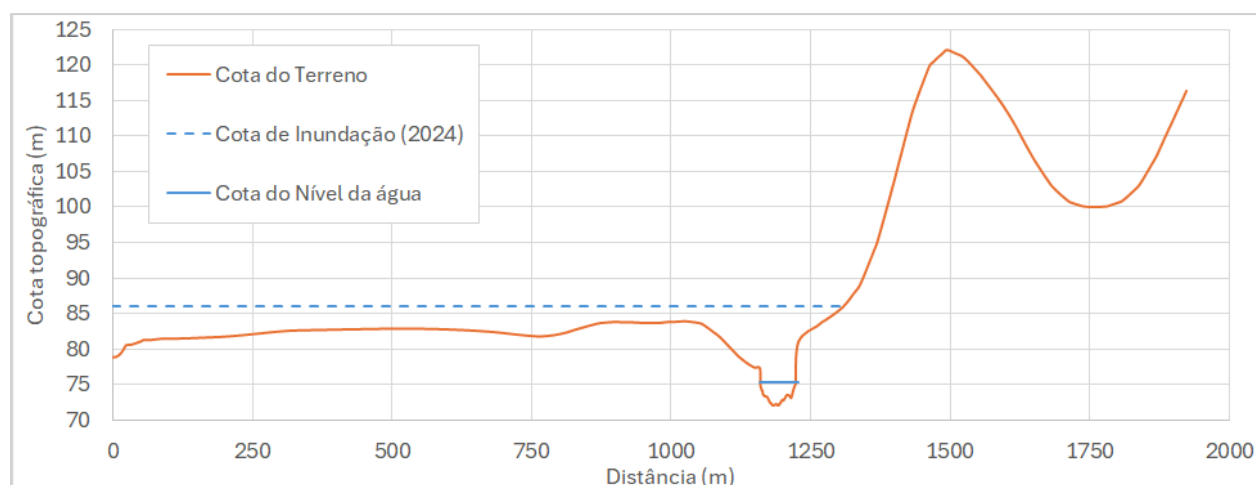


Figura 21. Seção transversal do rio Jaguari a jusante da ponte do Passo da França.



d) Cota do nível d'água medida num mesmo dia em todas as seções transversais, devidamente e datadas;

A partir do levantamento consistido pode ser observada a cota d'água registrada durante o levantamento do dia 30 de Outubro de 2024 (Figura 19 a Figura 21). A cota da superfície de água foi estimada em 75,40m nesta ocasião.

e) Cota do nível da cheia máxima observada, datada e com nome do informante (cheia máxima observada da própria ou de refluxo – represamento);

O nível da cheia máxima observada durante o evento de Abril-Maio de 2024 foi determinado com base nas informações fornecidas por moradores da vizinhança e região, que acompanharam o levantamento batimétrico. A partir do cruzamento desses dados com o levantamento topográfico realizado in loco, estimou-se que a água tenha atingido a cota 85,70 m durante a cheia de Abril-Maio de 2024.

f) Localização em planta do RN utilizado;

Uma vez que o levantamento topográfico foi amarrado pelo GNSS utilizado no levantamento batimétrico, no momento do levantamento foi estabelecido como RN temporário um ponto sobre os restos da ponte. Cabe reiterar que, se recomenda na etapa de projeto executivo, a implementação de pelo menos um RN fixo oficial a ser utilizado nessas etapas.

h) Identificar, em todas as seções, as margens do rio bem como as cotas de pé e topo de talude;

As cotas se encontram indicadas nas imagens das seções transversais descritas no item (c) Levantamento batimétrico no eixo geométrico ou na lateral da ponte existente.

k) Escondidade do eixo do curso d'água;

A escondidade do eixo do curso d'água foi considerada como o ângulo formado entre o eixo longitudinal do rio Jaguari e a normal ao eixo longitudinal da estrada que passa no eixo da ponte (Figura 22). Assim, o rio é classificado como normal (ou seja, está alinhado longitudinalmente a 90° com relação ao eixo da ponte).

Figura 22. Imagem da ponte do Passo da França, em imagem de novembro de 2023. A seta destaca a ponte onde se observa que ela é normal ao rio Jaguari.



l) Tipo de solo nas margens e no fundo do rio;

Conforme observado na Figura 16 (montante) e na Figura 17 (jusante), o solo é arenoso.

m) Tonalidade (cor) da água do rio;

Foi observada coloração da água marrom, indicando a presença de sólidos dissolvidos e em suspensão.

n) Descrição do tipo da vegetação nas margens do rio;

As margens do rio Jaguari na região da implantação da ponte são predominantemente cobertas por vegetação de espécies arbustivas, com grande parte da área como Área de Preservação Permanente (APP). A vegetação é bem preservada e densa, principalmente a montante. A jusante encontra-se áreas ocupadas por cultivos agrícolas.

o) Descrição do subleito dos taludes e fundo do rio;

Foi observada a presença de areia com a presença de argila, caracterizando um leito típico de área de várzea.

p) Medição da velocidade entre os pontos mais afastados do plano cotado (normais), medida 3 (três) vezes:

Foi realizada a medição da velocidade da água com o ADCP nas seções indicadas na Figura 15. A medição a jusante (Figura 23) indicou velocidade variável na seção, com máximos próximos de $1,1 \text{ m.s}^{-1}$, e vazão total na seção de $55,39 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. A medição a montante (Figura 24) indicou velocidades variáveis na seção, com máximos valores próximos a $1,2 \text{ m.s}^{-1}$ e vazão total de $53,38 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Considerando que foram realizadas pelo menos três medições em cada uma das seções, isso implica que, com base nas seis medições, a vazão no local foi estimada em $54 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. As diferenças nas medições se devem ao tempo transcorrido entre as medições e eventuais incertezas na medição ocasionadas pela grande presença de vegetação e outros detritos no canal, mas consideradas adequadas para a sua finalidade.

Figura 23. Medição de velocidade, vazão e batimetria da seção transversal do rio Jaguari a jusante do eixo da ponte do Passo da França.

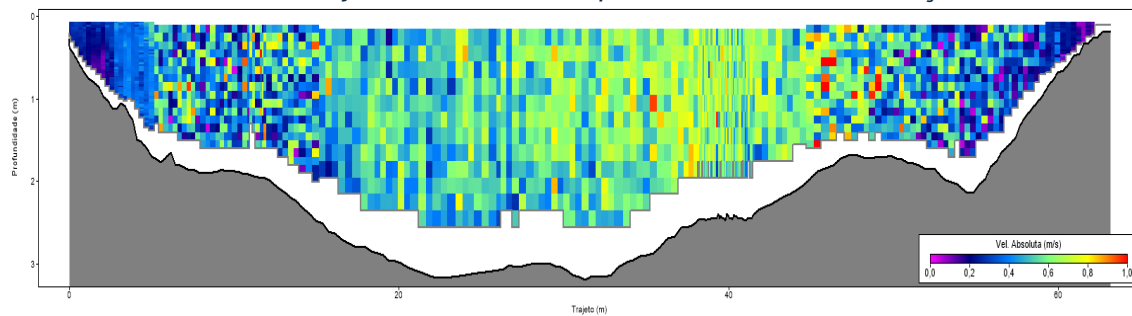
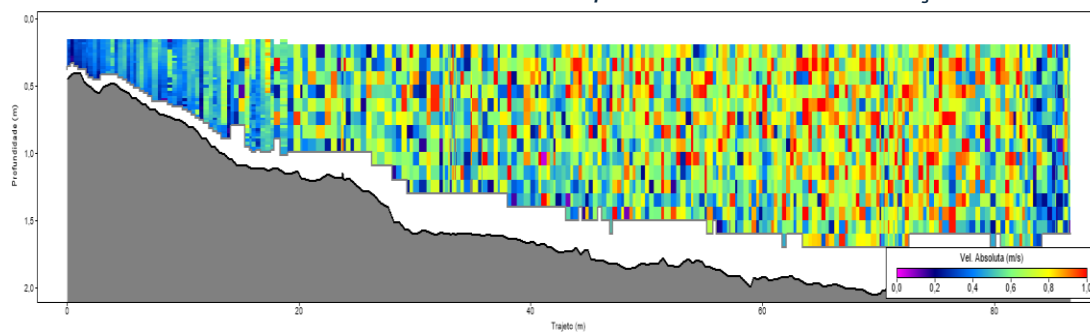


Figura 24. Medição de velocidade, vazão e batimetria da seção transversal do rio Jaguari a montante do eixo da ponte do Passo da França.



6. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA PRECIPITAÇÃO E VAZÃO

6.1 Estatísticas dos dados pluviométricos

Foram identificadas 4 estações pluviométricas na região com disponibilidade de dados diários 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

Código	Responsável	Operador	Nome da estação	Período de dados
2954007	ANA	SGB-CPRM	JAGUARI	1957-2024
2854013	ANA	SGB-CPRM	SÃO BERNARDO	1983-2024
2954030	ANA	SGB-CPRM	FLORIDA	1983-2024
2954001	ANA	SGB-CPRM	CACEQUI	1943-2024

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, verifica-se que todas as estações possuem pelo menos 41 anos de dados em período comum, mas nenhuma destas estações possui registro do evento de chuva do ano de 1941 – ano da Maior cheia do estado do Rio Grande do Sul antes de 2024. Destaca-se também que foram identificados postos pluviométricos com séries horárias da base de dados do INEMT em Tupanciretã-A886 (2016-2024), em Santiago-A833 (2009-2024) e São Vicente do Sul-A889 (2016-2024), mas que a extensão da série de dados disponível não permite as análises estatísticas apropriadas.

Assim, os 4 postos apresentados na Tabela 7 foram analisados estatisticamente, a fim de determinar as precipitações intensas para os períodos de recorrência de interesse neste estudo, sendo determinadas 4 relações IDF. Para obtenção de valores de precipitação sub-diárias, foram utilizados os coeficientes de desagregação sugeridos por Basso et al. (2016) e Roman (2015). O Quadro 1 apresenta as relações IDF obtidas para os 4 postos pluviométricos apresentados na Tabela 7.

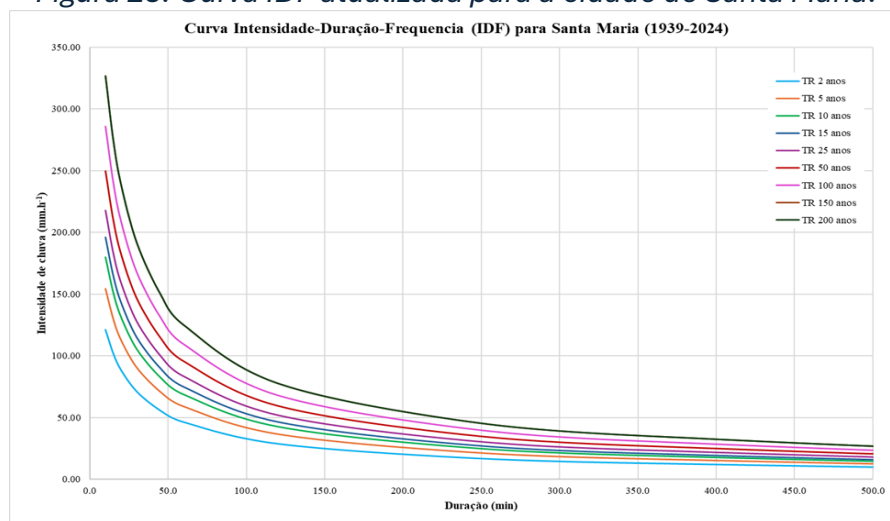
Complementarmente, o resultado desta análise foi comparado os resultados da equação IDF da cidade de Santa Maria (Equação 1 e Figura 25), determinada em 2024 (na oportunidade de desenvolvimento de diferentes estudos hidrológicos para reconstrução de pontes no Estado), tendo em vista que a mesma foi elaborada com dados de 1939 a 2024, e incorpora as principais cheias da história. Ademais, o posto utilizado para a determinação da IDF na cidade de Santa Maria localiza-se a 100 km de distância, e se constitui na informação de chuva intensa mais atualizada na região.

A equação IDF para Santa Maria incorpora precipitações com duração entre 24h a 60 dias, e os dados utilizados na elaboração da mesma 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 os autores da IDF utilizaram coeficientes de desagregação sugeridos por Basso et al. (2016) e Roman (2015). Maiores informações sobre esta IDF podem ser encontradas em (Allasia et al., 2024).

$$I = \frac{1085.496 \text{ TR}^{0.205}}{(t+9.799)^{0.764}} \quad (1)$$

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

Figura 25. Curva IDF atualizada para a cidade de Santa Maria.



Quadro 1 – Equações IDF ajustadas para os postos selecionados para o estudo

Posto pluviométrico	Relação IDF
Jaguari	$I = \frac{1244,419 \cdot TR^{0,1667}}{(t + 8,633)^{0,752}}$
São Bernardo	$I = \frac{1151,804 \cdot TR^{0,151}}{(t + 8,689)^{0,753}}$
Cacequi	$I = \frac{1223,3847TR^{0,106}}{(t + 8,455)^{0,748}}$
Florida	$I = \frac{1135,349 \cdot TR^{0,1199}}{(t + 8,528)^{0,7497}}$

6.2 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 ponte deve considerar **a Maior cheia do histórico**, independentemente do Tempo de Retorno estimado para esta cheia. Seguindo esse raciocínio, a cota de projeto da ponte, deveria ser a da enchente de Abril-Maio de 2024. No entanto, a própria Nota técnica 2024 IPH-UFRGS, indica a necessidade de majorar a precipitação, e para áreas de bacia Maiores que 1000 km², **utilizar para o projeto o TR de 350 anos**.

7. DETERMINAÇÃO DE VAZÃO DE PROJETO

Os itens seguintes descrevem os resultados do protocolo metodológico empregado para determinar a vazão de projeto, iniciando pela determinação do tempo de concentração, determinação do hietograma de projeto e ajuste do modelo hidrológico.

7.1 Estimativa do tempo de concentração

Conforme Brasil (2005), a avaliação do tempo de concentração de uma bacia é bastante complexa, devido aos inúmeros condicionantes envolvidos, existindo uma grande variedade de expressões de cálculo, merecendo, por isso, grande atenção na sua determinação, pois influencia significativamente no resultado da vazão de projeto. De uma forma geral, para uma mesma bacia hidrográfica a vazão máxima calculada é proporcional ao inverso do tempo de concentração para ela considerado.

A IS121/21 indica simplesmente que o tempo de concentração deverá ser estimado pela fórmula do antigo DNOS. Para bacias muito grandes, em que o tempo de concentração é superior a 24h, é indicado o uso da metodologia de Otto Pfafstetter. No entanto, as instruções do DNIT (Brasil, 2005; 2006) fazem uma análise mais detalhada da questão, recomendando que se dê preferência às fórmulas que conduzem a valores razoáveis tanto para bacias pequenas quanto para as médias e grandes bacias hidrográficas, e neste documento é indicado que sejam avaliadas as equações de Kirpich, DNOS, Kirpich modificado, George Ribeiro, Pasini e Ventura. Em particular, conforme resultados obtidos em análise de mais de 200 bacias estudadas pelo DNER, é indica a equação de Kirpich Modificada 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: t_c 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 => $K=5,5$

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

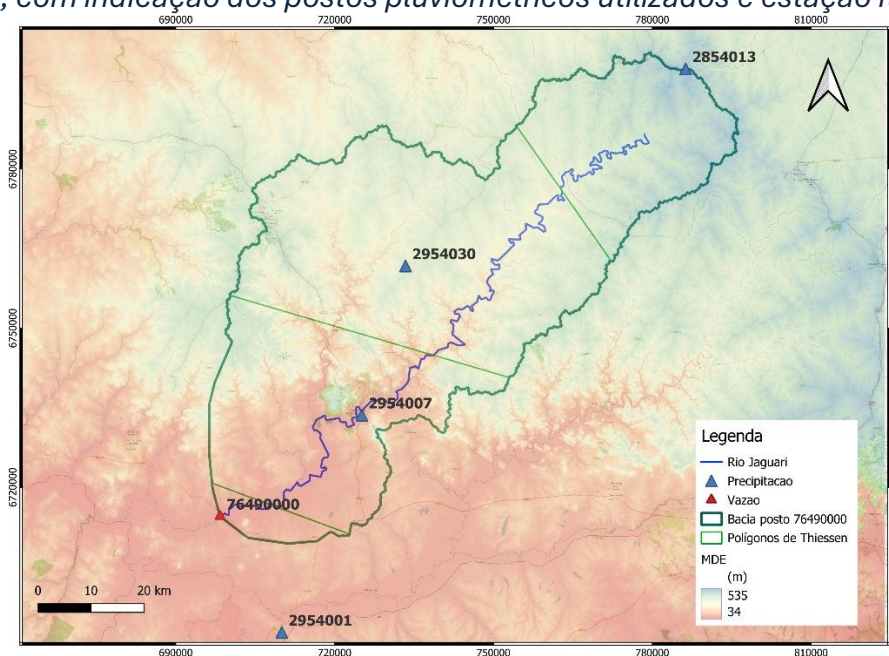
Sendo: t_c o tempo de concentração (horas); L o comprimento do curso d'água (km); e H = desnível máximo (m).

Para a bacia hidrográfica do rio Jaguari até a ponte na localidade de Passo da França, com área 4194 Km², comprimento da drenagem de 201 km e, utilizando K de 3,5 em função das características da bacia hidrográfica, resulta em um tempo de concentração de 51,41 horas, determinado pela equação do DNOS. Pela equação de Kirpich modificado, considerando um desnível altimétrico de 387,87 m, comprimento da drenagem de 201 km, resultou um tempo de concentração de 52,76 horas (aproximadamente 3490 minutos). Desta forma, verifica-se que ambas as equações fornecem valores de tempo de concentração muito similares, reforçando a qualidade dessa estimativa. Para dar prosseguimento ao estudo foi utilizada uma duração de 3240 minutos como referência para determinação da chuva de projeto, valor ligeiramente superior ao tempo de concentração da bacia hidrográfica, de forma a não promover o decréscimo da intensidade da chuva ao considerar durações superiores, como bem reforça a IPR-715 do DNIT (Brasil, 2005).

7.2 Hietograma de projeto

A chuva de projeto para os tempos de retorno de 100 e 350 anos foi determinada a partir de sua duração, definida em função do tempo de concentração, e espacialização das informações de chuvas intensas determinadas por meio do emprego das relações IDF determinadas para os 4 postos pluviométricos, conforme apresentado em 6.1 Estatísticas dos dados pluviométricos. A poligonização para espacialização é apresentada na Figura 26. Os coeficientes de Thiessen de ponderação para cada posto estão apresentados na Tabela 8.

Figura 26. Polígonos de Thiessen para espacialização da precipitação na bacia hidrográfica, com indicação dos postos pluviométricos utilizados e estação fluviométrica



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 8 – Ponderadores de Thiessen para espacialização da precipitação

Nome do posto	Código do posto	Ponderador
JAGUARI	2954007	0,30
SÃO BERNARDO	2854013	0,20
FLORIDA	2954030	0,47
CACEQUI	2954001	0,03

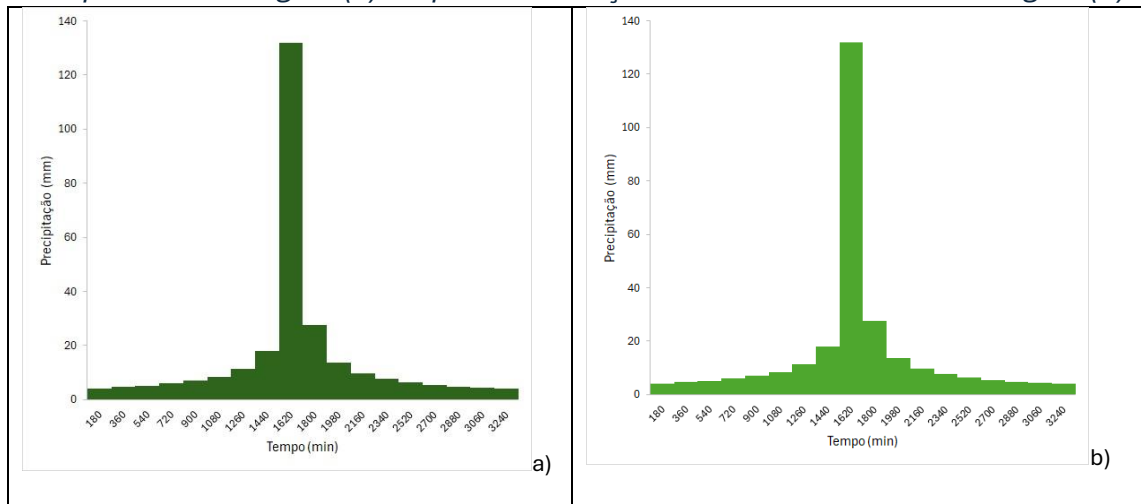
As precipitações de projeto determinadas a partir de relações IDF, em função de seu caráter sintético, necessitam tratamento adicional que busca reproduzir a aleatoriedade da distribuição dos volumes de precipitação ao longo da duração da chuva. Esse processo de distribuição temporal pode seguir um comportamento natural das precipitações, com padrão dificilmente identificável. Assim, normalmente métodos sintéticos de distribuição temporal são empregados.

Os métodos mais consagrados são aqueles que atribuem uma distribuição temporal arbitrária para chuvas de projeto, a exemplo do método dos blocos alternados (MBA), que permite construir um hietograma de projeto a partir da relação IDF. Este método é amplamente empregado para elaboração de hietogramas em estudos envolvendo obras de drenagem e foi considerado neste estudo. Como critérios para a aplicação do método foi utilizada uma discretização temporal de 180 minutos, compatível com a mínima duração das IDF obtidas, com posição do pico da precipitação na metade da duração da chuva, e ordenamento do segundo Maior volume à direita do pico. A duração total do hietograma se adotou de 3240 min, igual ao tempo de concentração da bacia. Os hietogramas para o tempo de retorno de 100 anos obtidos a partir da espacialização da informação dos 4 postos pluviométricos do interior da bacia hidrográfica, e a partir da relação IDF de Santa Maria são apresentados na [Figura 27](#) (a) e (b), respectivamente. Os hietogramas para os tempos de retorno de 350 anos são apresentados da mesma forma na [Figura 28](#).

A partir desta análise inicial verificou-se, por exemplo, que a utilização do hietograma obtido a partir da precipitação espacializada dos 4 pluviômetros produziu um volume de precipitação de 10% (100 anos) a 16% (350 anos) inferior à precipitação determinada com os dados da IDF de Santa Maria. Dessa forma, considerou-se mais adequado considerar os hietogramas determinados a partir da IDF de Santa Maria para determinar as vazões de projeto, especialmente por esta relação incorporar as chuvas que deram origem às cheias mais críticas da história do Estado, em atendimento às recomendações feita pelo Governo do RS para garantir a resiliência climática das estruturas (Adequação dos critérios de

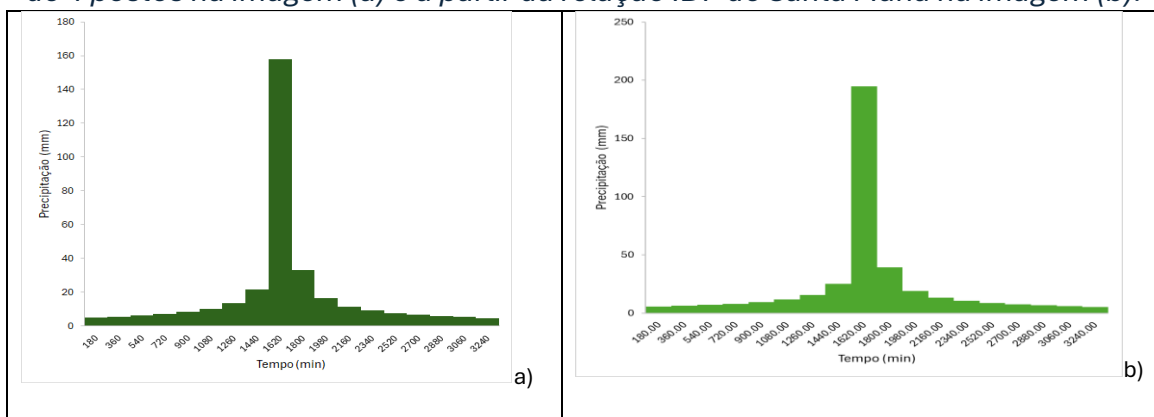
projeto), e ter sido determinada com base em precipitações sub-diárias, que permitem um melhor conhecimento de chuvas de curta duração.

Figura 27. Hietogramas de projeto para 100 anos de tempo de retorno na bacia hidrográfica do rio Jaguari junto à ponte do Passo da França – a partir da espacialização da informação de 4 postos na imagem (a) e a partir da relação IDF de Santa Maria na imagem (b).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 28. Hietogramas de projeto para 350 anos de tempo de retorno na bacia hidrográfica do rio Jaguari junto à ponte do Passo da França – a partir da espacialização da informação de 4 postos na imagem (a) e a partir da relação IDF de Santa Maria na imagem (b).



7.3 Ajuste do modelo hidrológico

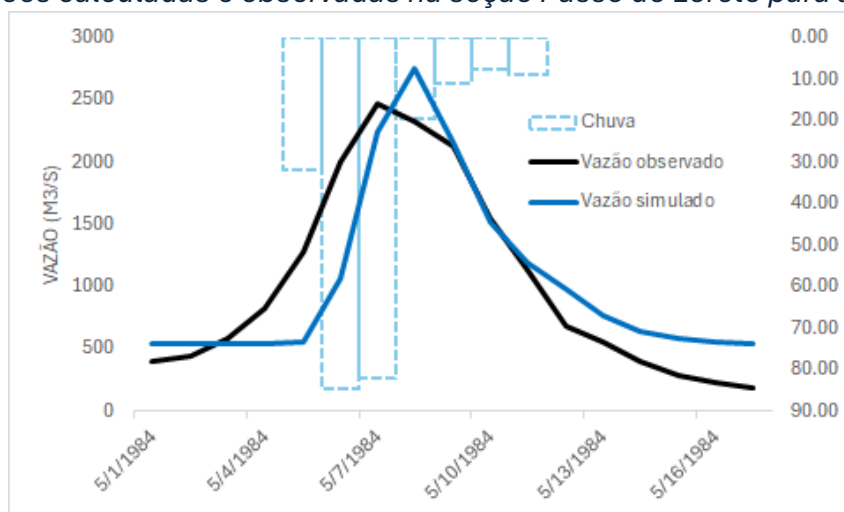
7.3.1 Avaliação da adequabilidade do uso dos modelos Curva Número (CN) e do Hidrograma Unitário Triangular

A bacia hidrográfica em estudo possui área superior ao valor recomendado; assim, diante da inexistência de outra metodologia recomendada na mesma IS, procedeu-se com uma etapa inicial de verificação de viabilidade de aplicação desta metodologia.

Para isso, foi realizada uma modelagem chuva-vazão utilizando como ferramenta auxiliar modelo hidrológico (HEC-HMS) para realização das análises. Neste modelo foi representada a bacia hidrográfica delimitada até a estação fluviométrica Passo do Loreto (76.490.000), que tem área de 4.600 km², única informação de vazão disponível na proximidade. O objetivo deste processo foi avaliar se o emprego da Curva Número (CN) e do Hidrograma Unitário Triangular do Natural Resource Conservation Service seriam capazes de reproduzir a cheia observada na estação fluviométrica, portanto, estes métodos foram selecionados durante o emprego do modelo. A justificativa para este procedimento apoia-se no fato de que a bacia hidrográfica de contribuição até esta estação fluviométrica tem somente área 10% superior à área da bacia hidrográfica de contribuição até a ponte em estudo. Assim, se os modelos forem capazes de reproduzir as vazões observadas nesta estação, também são válidos para modelar a cheia que ocorre ligeiramente a montante. Para este procedimento priorizou-se ajustar o modelo para reproduzir momentos de cheias; assim, selecionou-se a cheia observada em Maio de 1984 como referência, pois ela se apresenta como o Maior registro histórico observado na estação.

A Figura 29 mostra o ajuste do modelo para reproduzir a cheia observada, com a indicação da chuva média espacial na bacia hidrográfica, e a vazão observada na seção de Passo do Loreto. Para este ajuste foram obtidos bons indicadores de eficiência (NSE=0,73 e Erro de volume inferior a 10%) para o evento simulado utilizando o tempo de concentração de 3240 minutos, com valor do parâmetro CN de 73, o que correspondia a um valor adequado para este parâmetro, considerando o uso e ocupação do solo de 1984 (a Figura 30 mostra uma comparação entre as imagens de 1984 e 2023).

Figura 29. Vazões calculadas e observadas na seção Passo do Loreto para a cheia de 1984

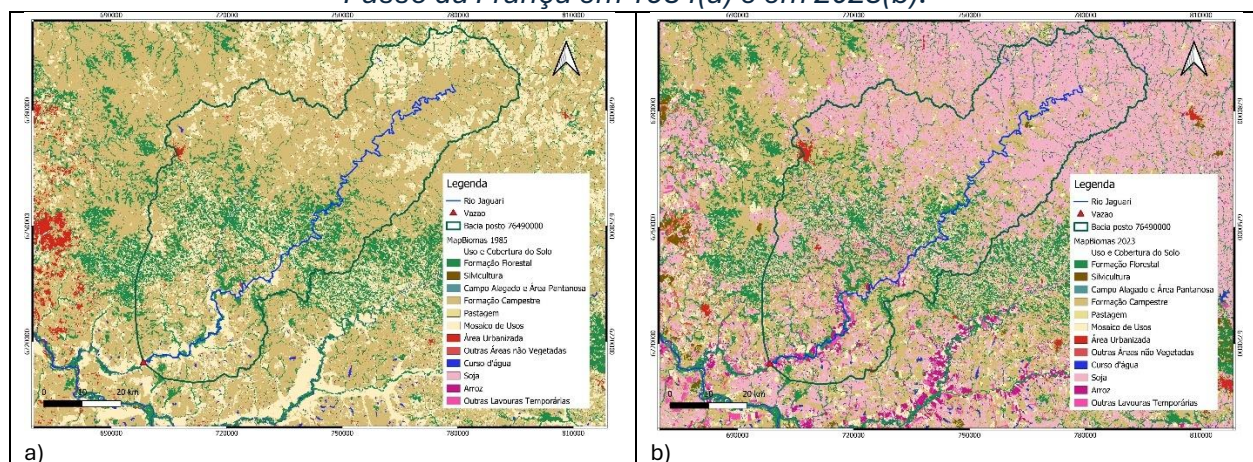


Fonte: Elaboração própria.

Em 1984 predominavam em mais de 80% da área da bacia hidrográfica as formações campestres e pastagens. Em 2023, mais de 43% da área da bacia hidrográfica já estava ocupada pelo cultivo de soja, conforme apresentado em 3.3 Uso e ocupação do solo, em substituição especialmente das formações campestre e pastagens.

Dessa forma, considerou-se os modelos Curva Número (CN) e do Hidrograma Unitário Triangular foram adequados para representar o processo chuva-vazão na bacia hidrográfica, e que o tempo de concentração estimado foi adequado. Ainda, se observou o baixo valor de CN para a data do registro do evento, o que possivelmente deverá ser aumentado para reproduzir a cheia de 2024, em função da mudança de uso e cobertura do solo – conforme observado em imagens de satélite mais recentes.

Figura 30. Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Jaguarí junto à ponte do Passo da França em 1984(a) e em 2023(b).

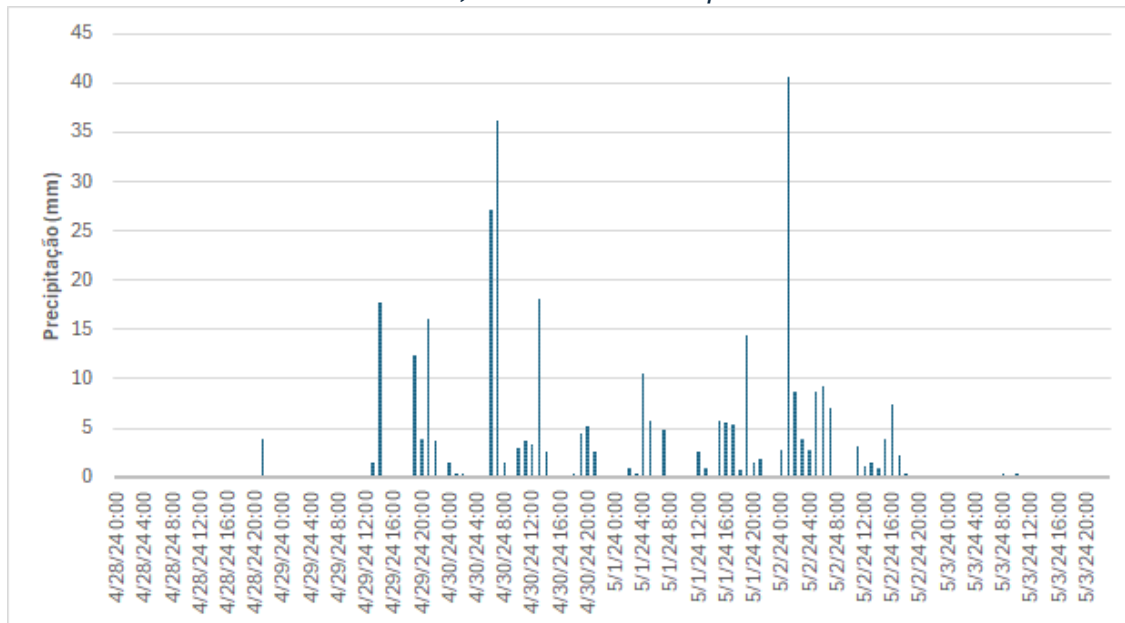


Fonte: Elaboração própria.

7.3.2 Evento de calibração de 2024

Em razão da adequabilidade dos modelos empregados para o processo chuva-vazão, deu-se prosseguimento à calibração dos modelos hidrológicos (HEC-HMS) e hidráulico (HEC-RAS), com base no evento de chuva ocorrido entre Abril-Maio de 2024, para o qual foi possível medir a altura máxima da água, ou seja, a cota atingida pela passagem da cheia, e delimitar a zona atingida pela inundação. Para isso, foi realizada a simulação chuva-vazão do hietograma de chuva horária dos dias 28 de Abril a 03 de Maio de 2024 registrado na estação do INMET de Tupanciretã (Figura 31), que está localizada na região de cabeceira da bacia hidrográfica, e em zona onde foram observados os registros de chuvas mais expressivas no Estado (Collischonn et al., 2024). A utilização da chuva horária permite uma análise do processo de formação da cheia com alta frequência temporal, e melhor entendimento da cota de inundação identificada na região durante o levantamento de campo. A chuva de base diária poderia “filtrar” picos de vazão, e consequentemente cota de cheia, que se produziram em um curto período de tempo, como aqueles decorrentes das chuvas intensas – curta duração e alta intensidade.

Figura 31. Hietograma da chuva para o evento de Abril-Maio de 2024 obtido na estação do INMET A886, localizada em Tupanciretã.



Fonte: Elaboração própria.

Para a calibração dos modelos, este hietograma foi inserido no HEC-HMS para simulação da vazão resultante, considerando os parâmetros hidrológicos de referência, previamente determinados. Essa vazão foi então transferida para o HEC-RAS nas seções correspondentes, onde foi realizada a modelagem hidráulica do trecho da ponte. Para ajustar os modelos de forma que eles representassem o mais fielmente possível a dinâmica do escoamento, os parâmetros do modelo, como o Número de Curva (CN) e o Coeficiente de Rugosidade de Manning foram ajustados iterativamente – simulação hidrológica seguida de hidráulica até a convergência para um valor considerado adequado, dentro de valores aceitáveis para os parâmetros (o tempo de concentração foi mantido fixo, conforme previamente determinado). O processo de ajustamento foi manual, e como variável de controle objetivou-se reproduzir, por meio da simulação no HEC-RAS, a melhor correspondência possível entre a mancha de inundação observada para a cheia e a simulada. O tempo de concentração no modelo hidrológico foi mantido fixo, e igual ao determinado e apresentado em Estimativa do tempo de concentração.

7.3.3 Topologia de simulação

A Figura 32 representa a topologia de simulação desta bacia hidrográfica no modelo HEC-HMS, cuja delimitação considerara a topografia, cursos d'água existentes e a seção da ponte, objetivando a análise subsequente com modelagem hidrodinâmica. Os resultados da vazão calculada foram exportados e utilizados como condição de contorno de montante no modelo HEC-RAS.

Figura 32. Esquema topológico de representação da bacia hidrográfica do rio Jaguari junto à ponte do Passo da França no HEC-HMS.

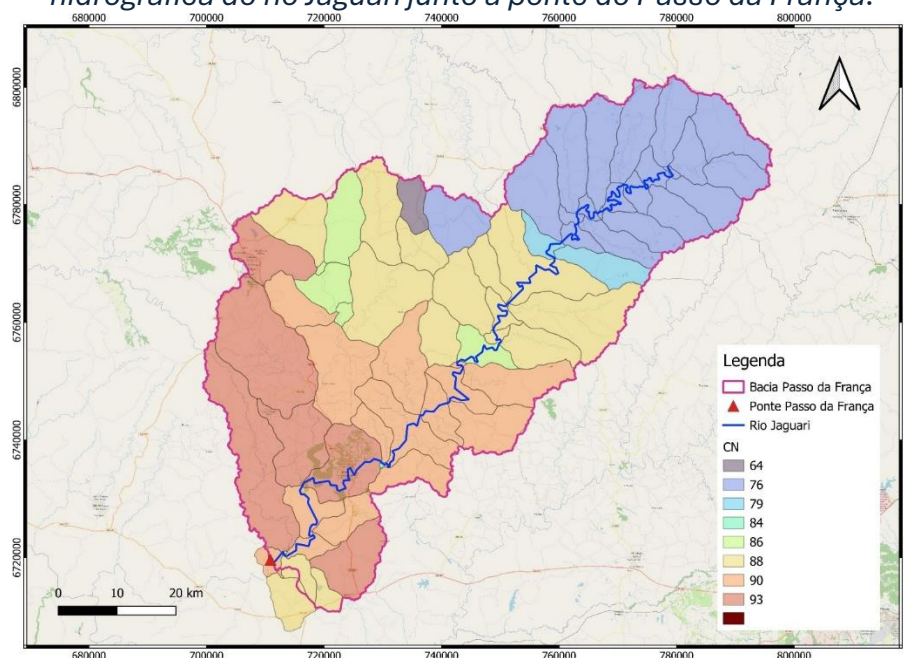


Fonte: Elaboração própria.

7.3.4 Calibração do parâmetro CN

O valor de CN de referência para a bacia hidrográfica com cenário atual de uso e ocupação do solo foi obtido a partir do produto BHO_CN_2018, descritas na Nota Técnica nº 46/2018/SPR da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Esse produto contém os parâmetros CN espacializados para a Base Hidrográfica Ottocodificada de 2014 (Figura 33), e está baseado no mapa de uso e ocupação do solo do Brasil para o ano de 2014, conforme estimativas do IBGE (ANA, 2018), e reflete uma condição mediana de umidade inicial.

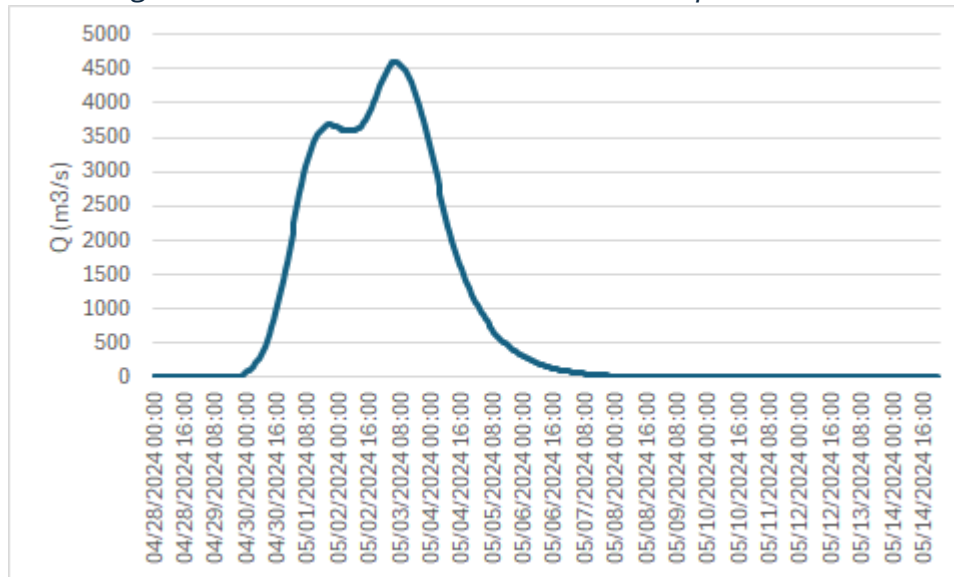
Figura 33. Mapa do parâmetro CN para o cenário atual de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Jaguari junto à ponte do Passo da França.



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

Durante o processo de calibração para reprodução da cheia de Abril-Maio de 2024 resultou um valor médio de CN para a bacia igual a 90, que corresponde à condição de solo saturado (que representa a condição III conforme o NRCS), o que se justifica frente às características do evento utilizado na calibração que foi precedido por elevados volumes de chuvas anteriores. Verifica-se que este valor é superior ao CN 73 obtido durante a simulação da cheia de 1984, o que era esperado, em razão da expressiva mudança de uso e cobertura do solo para processos que fazem com que haja Maior produção de escoamento superficial. Os valores de rugosidade ajustados para o modelo hidráulico estão apresentados no item DETERMINAÇÃO DAS COTAS E VELOCIDADES DE PROJETO. O hidrograma resultante para o modelo hidrológico calibrado na ponte do Passo da França é apresentado na Figura 34 para a cheia de Abril-Maio de 2024.

Figura 34. Hidrograma da cheia de Abril-Maio de 2024 na ponte do Passo da França.



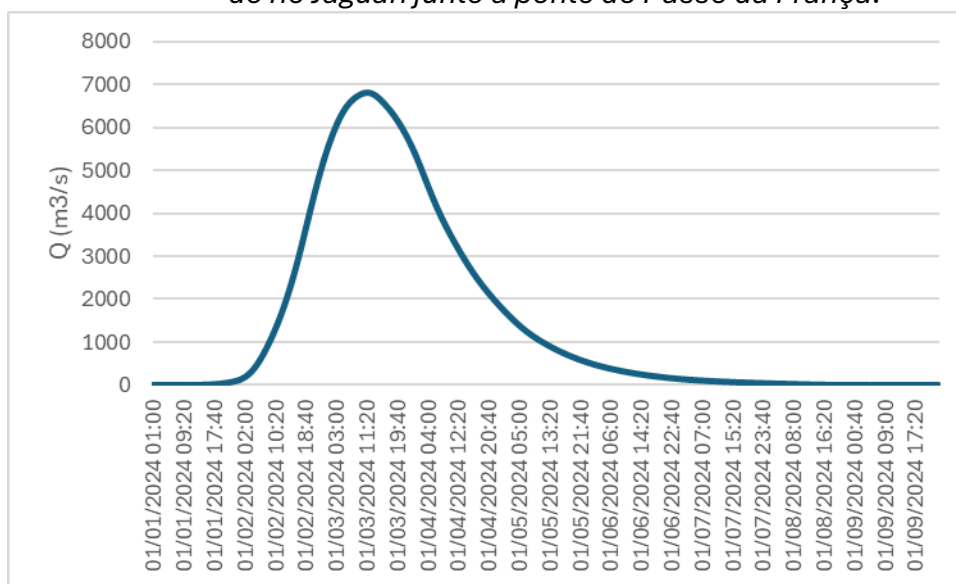
Fonte: Elaboração própria.

7.4 Vazão de projeto

De posse dos parâmetros hidrológicos ajustados, conforme acima descrito, foi realizada a simulação dos hietogramas de projeto com 100 anos e 350 anos de tempo de retorno, visando a determinação das vazões de projeto para a bacia do Rio Jaguari, com exutório na ponte da localidade de Passo da França. Os hidrogramas de projeto resultantes são apresentados em forma gráfica, onde se observam **vazões máximas de 6800,6 m³.s⁻¹ e 8984,2 m³.s⁻¹ para 100 e 350 anos de tempo de retorno**, respectivamente.

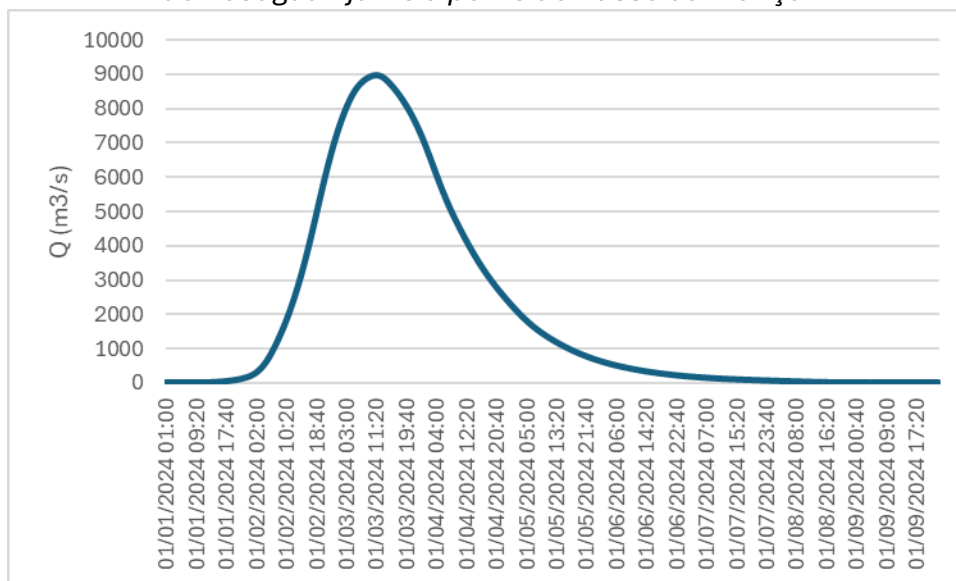
Portanto, com base nestas análises verifica-se que os eventos de projeto com 100 e 350 anos de tempo de retorno possuem vazões de pico que superam a vazão de pico do evento de Abril-Maio de 2024, sendo que estes valores devem ser tomadas como referência para os projetos de infraestrutura.

Figura 35. Hidrograma de projeto para 100 anos de tempo de retorno na bacia hidrográfica do rio Jaguari junto à ponte do Passo da França.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 36. Hidrograma de projeto para 350 anos de tempo de retorno na bacia hidrográfica do rio Jaguari junto à ponte do Passo da França.



Fonte: Elaboração própria.

8. DETERMINAÇÃO DAS COTAS E VELOCIDADES DE PROJETO

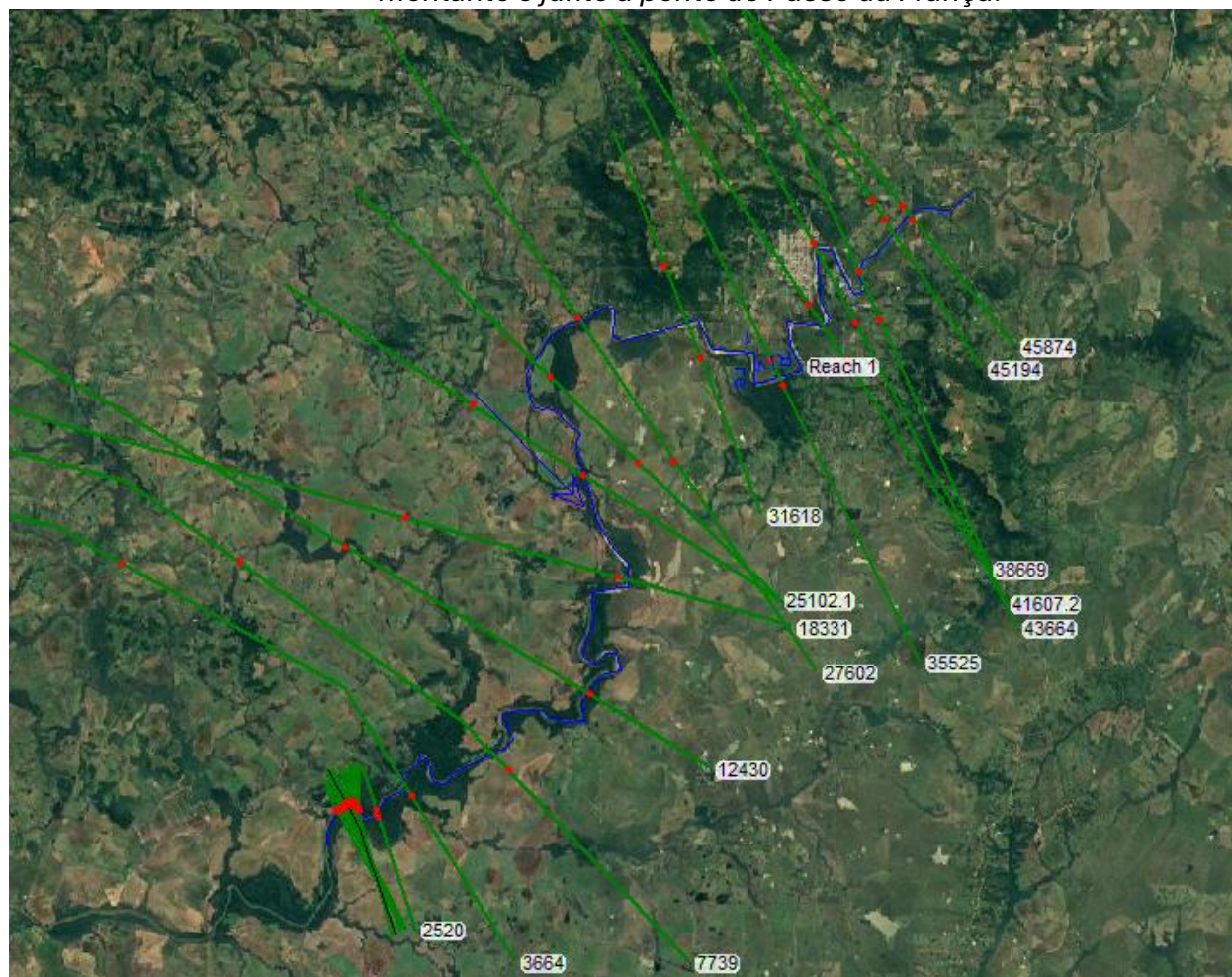
8.1 Ajuste do modelo hidráulico

Com o objetivo de estimar a vazão de projeto no modelo hidráulico HEC-RAS, primeiramente procedeu-se à calibração iterativa deste modelo, ao mesmo tempo em que era realizada a calibração hidrológica, conforme descrito em Ajuste do modelo hidrológico. A cota de cheia de Abril-Maio de 2024 foi utilizada como critério para verificar a qualidade do resultado da modelagem, quando simulado o hidrograma apresentado na Figura 34.

A representação hidráulica do rio no modelo HEC-RAS inclui o próprio trecho do rio, além das seções transversais ao longo deste. A fim de representar a mudança das declividades do rio Jaguari, que afetam diretamente as velocidades na área da ponte, foi modelada uma extensão do rio até aproximadamente 46 km a montante da região da ponte. As informações para a representação dos elementos geométricos foram obtidas a partir do levantamento topográfico e batimétrico, conforme apresentado em RESULTADOS DO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO E BATIMÉTRICO. Além das seções topobatimétricas medidas, foi possível representar seções adicionais com intervalos de 20 a 30 metros, conforme a complexidade geométrica em planta, para representar o rio com o máximo de fidelidade. A batimetria dessas seções foi obtida por interpolação dos dados batimétricos medidos quando disponíveis. Na região de montante, 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.

O hidrograma para o evento de cheia de Abril-Maio de 2024 foi inserido como entrada no modelo HEC-RAS. O esquema topológico de representação de geometria simulada é apresentado na Figura 37, onde se vê em azul o trecho de rio simulado, em verde as seções transversais do rio representadas no modelo e em preto a região da seção da antiga ponte do Passo da França.

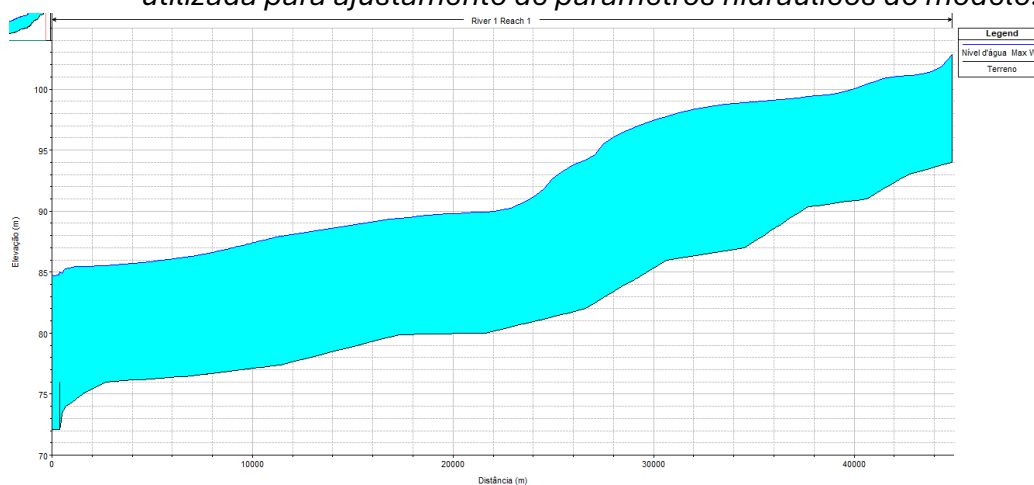
Figura 37. Esquema topológico de representação do trecho do rio Jaguari no HEC-RAS, a montante e junto à ponte do Passo da França.



Fonte: Elaboração própria.

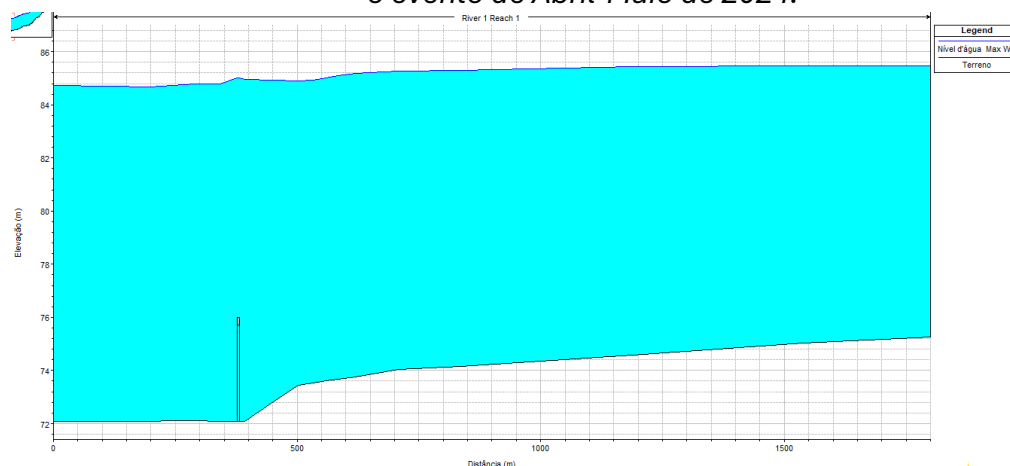
O perfil de linha d'água ao longo do eixo longitudinal da calha do rio Jaguari modelado no HEC-RAS para o evento de cheia de Abril-Maio de 2024 é apresentado na Figura 38, com um destaque para a zona da ponte na Figura 39. O evento foi simulado considerando a presença da ponte do Passo da França que existia no local, para representar os efeitos da existência nas condições de escoamento durante a enchente, e como a estrutura contribuiu para a elevação do nível da água (Figura 40).

Figura 38. Perfil longitudinal do trecho do rio Jaguari para o evento de Abril-Maio de 2024 utilizada para ajustamento de parâmetros hidráulicos do modelo.



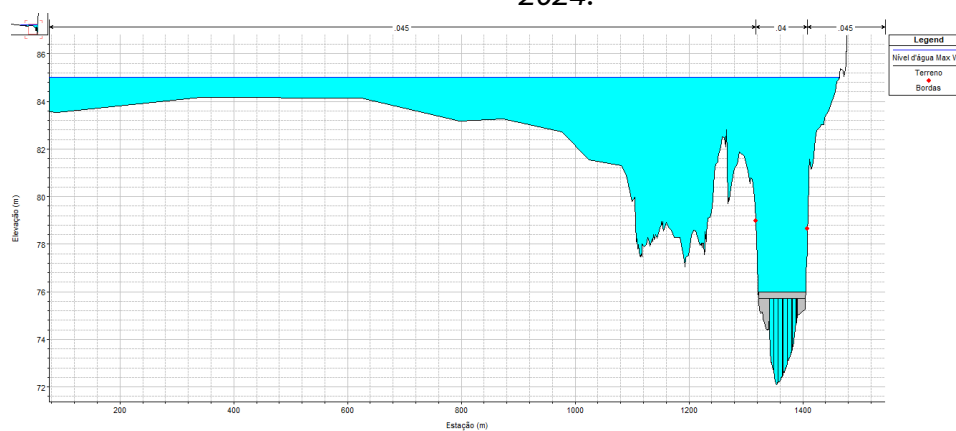
Fonte: Elaboração própria.

Figura 39. Perfil longitudinal do trecho do rio Jaguari junto à ponte do Passo da França para o evento de Abril-Maio de 2024.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 40. Seção hidráulica da ponte do Passo da França para o evento de Abril-Maio de 2024.

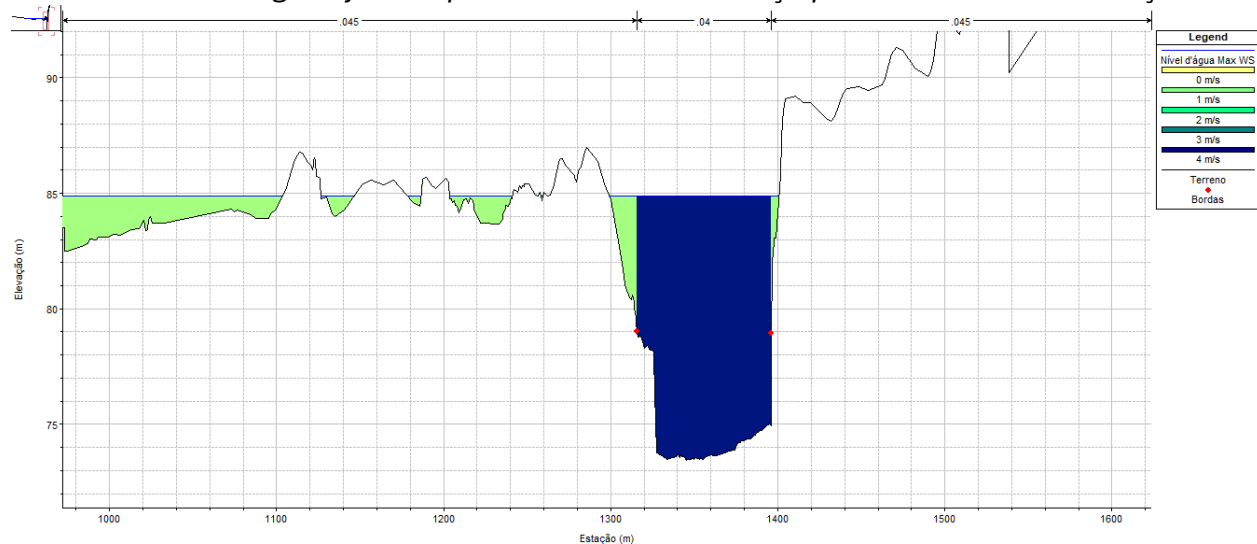


Fonte: Elaboração própria.

As seções transversais do rio Jaguari a montante, no eixo, e a jusante do local de implantação da ponte do Passo da França, em conjunto com a distribuição de velocidades nas margens do rio e na calha principal são apresentadas da

Figura 41 até a Figura 43, mostrando o nível d'água modelado para a calibração com o evento de cheia de Abril-Maio de 2024 (as seções utilizadas correspondem àquelas obtidas no levantamento de campo, e apresentadas no item RESULTADOS DO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO E BATIMÉTRICO). Conforme se observa, foi obtida boa concordância entre as cotas do nível de água simuladas e observados durante o levantamento de campo para a cheia de Abril-Maio de 2024 - a cota simulada na aproximação da ponte foi de aproximadamente 85 m e, em região a montante desta, em função da influência no represamento do escoamento, a cota atingiu o máximo de 85,30 m, valor bastante próximo à estimativa realizada durante o levantamento de campo que foi de 85,70m, mostrando o bom ajustamento do modelo.

Figura 41. Seção transversal e distribuição de velocidades a montante do eixo da ponte do rio Jaguari junto à ponte do Passo da França para o evento de calibração.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 42. Seção transversal e distribuição de velocidades no eixo da ponte do rio Jaguari junto à ponte do Passo da França para o evento de calibração.

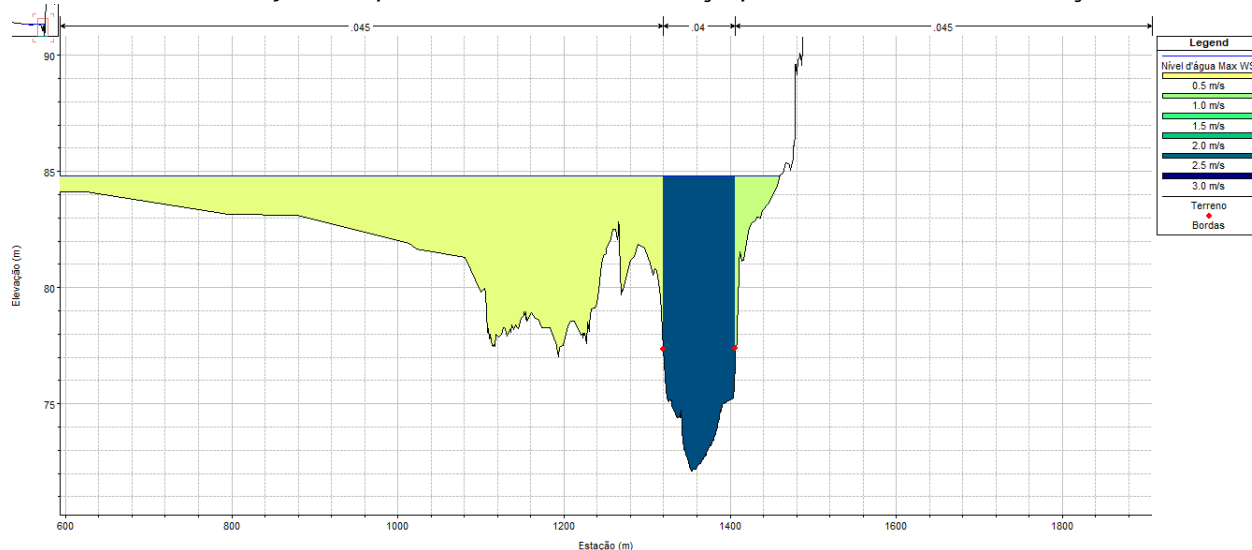
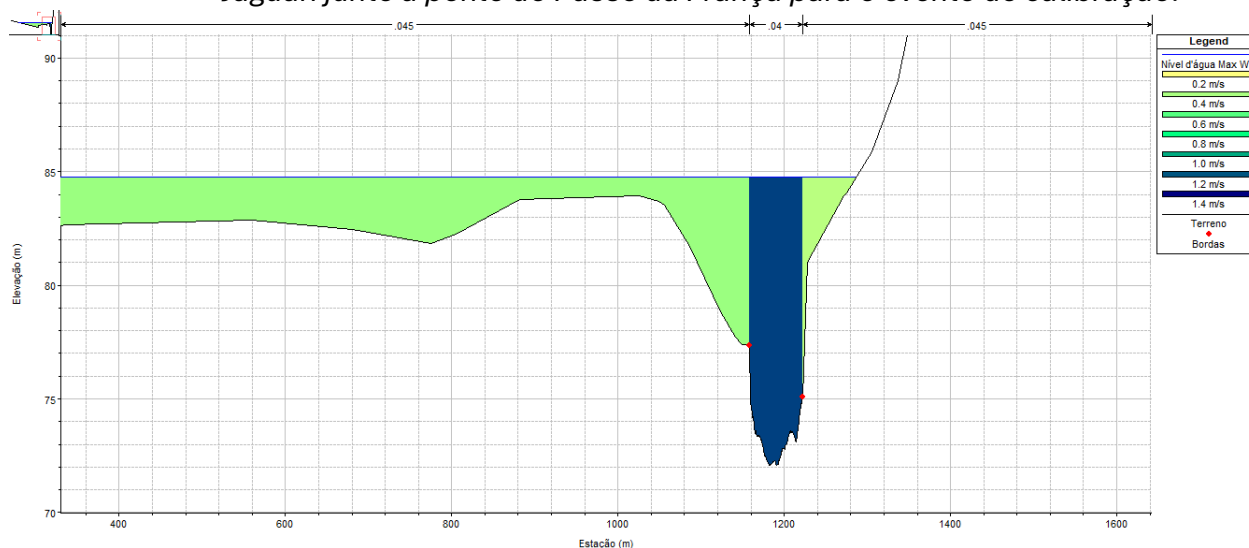


Figura 43. Seção transversal e distribuição de velocidades a jusante do eixo da ponte do rio Jaguari junto à ponte do Passo da França para o evento de calibração.



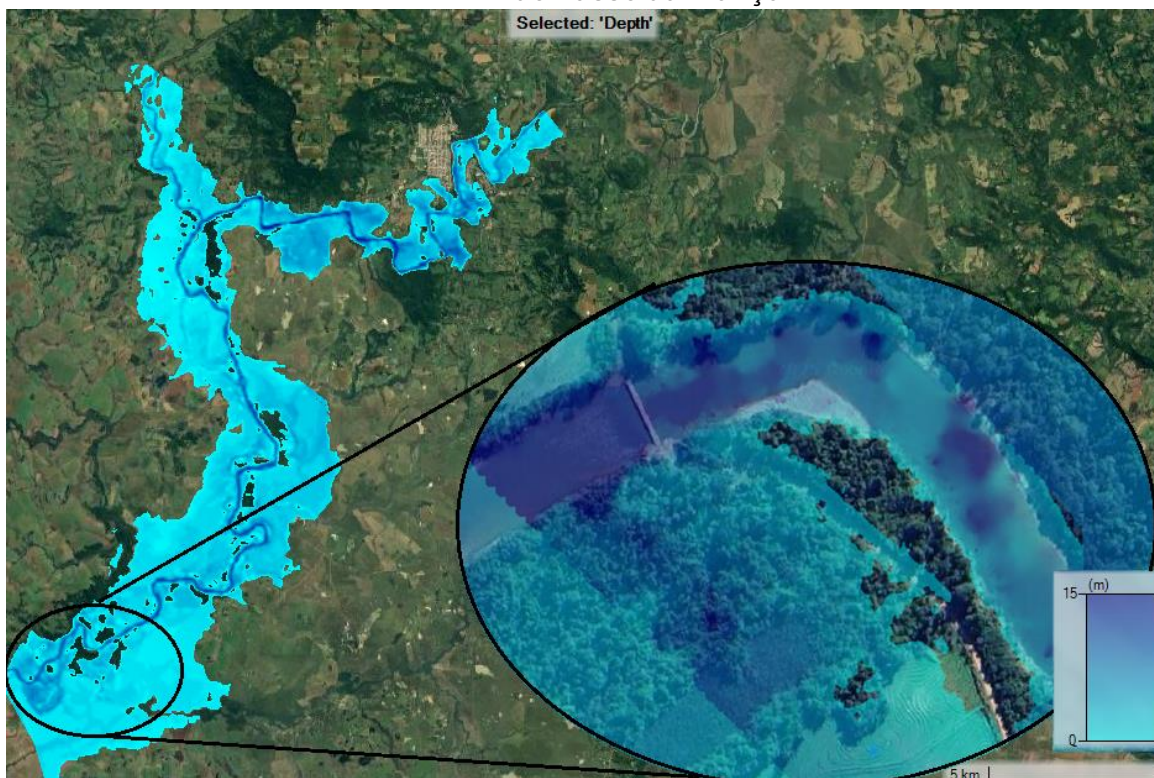
As vazões, velocidades médias do escoamento na seção transversal, e demais indicadores hidráulicos obtidos durante a calibração do modelo HEC-RAS estão resumidos na Tabela 9 para as seções de montante, eixo e jusante do local de implantação da ponte do Passo da França no rio Jaguari. A velocidade máxima na calha do rio para o evento de calibração

atingiu 3,84 m.s⁻¹. A mancha de inundação produzida durante o processo de calibração para o evento do Abril-Maio de 2024 é apresentada na Figura 44.

Tabela 9. Indicadores hidráulicos obtidos durante a calibração do modelo HEC-RAS para cheia de Abril-Maio de 2024.

Seção do arroio com relação à ponte	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Cota d'água (m)	Velocidade na calha (m.s ⁻¹)	Seção de escoamento (m ²)	Largura da superfície de escoamento (m)	Número de Froude
Montante	4.499,67	84,89	3,84	2.677,3	2.186,77	0,38
Eixo	4.499,71	84,79	2,62	4.192,43	2.304,31	0,25
Jusante	4.499,67	84,74	1,25	8.982,18	3.089,54	0,12

Figura 44. Mancha de inundação para o evento de calibração simulada ao longo do rio Jaguari, mostrando o detalhe em destaque a inundação junto à região da ponte do Passo da França



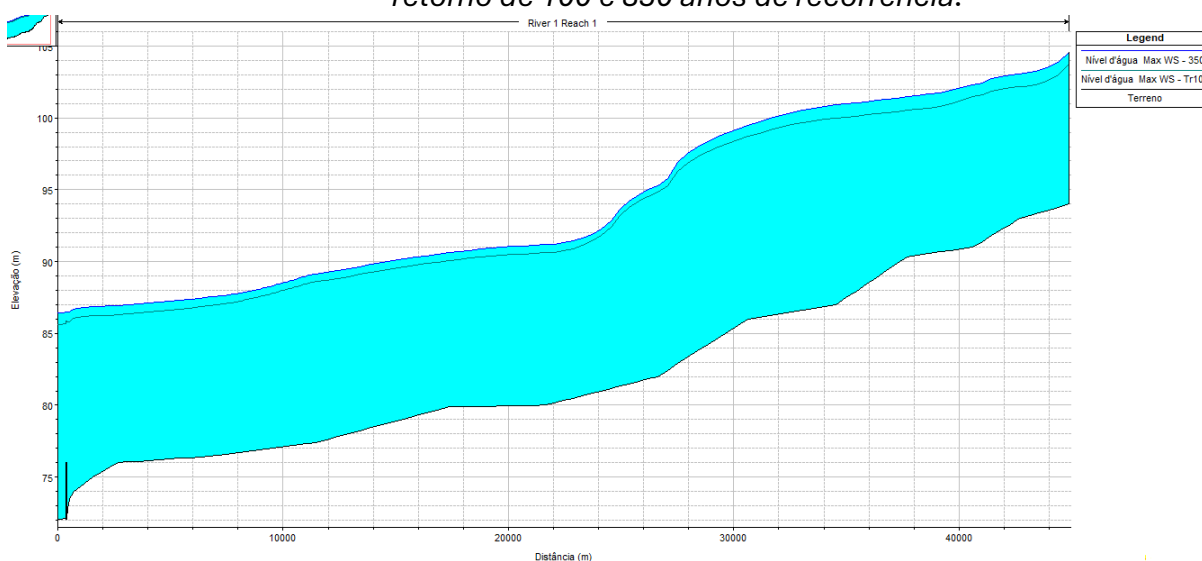
Fonte: Elaboração própria.

8.2 Simulação das vazões de projeto

Uma vez ajustados os parâmetros hidráulicos do HEC-RAS, foi realizada a simulação da vazões de projeto determinadas a partir da introdução dos hidrogramas de projeto com tempos de retorno de 100 (Figura 35) e 350 anos (Figura 36). Essa simulação foi realizada considerando o escoamento em regime não permanente, com as rugosidades previamente ajustadas, e a estrutura da ponte foi removida da geometria de simulação, em razão da sua destruição durante a cheia de Abril-Maio de 2024.

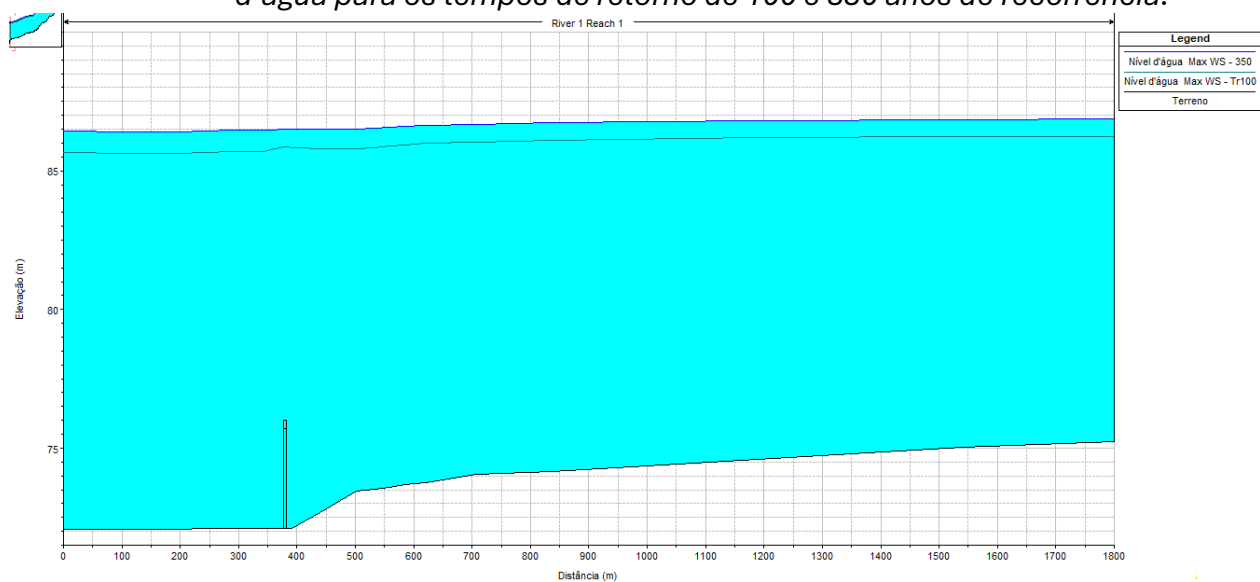
As vazões, velocidades e demais informações hidráulicas para os hidrogramas de projeto obtidas por meio da modelagem são apresentadas na Tabela 10. Nesta tabela verifica-se que as vazões máximas refletem os valores propagadas hidrodinamicamente, e são ligeiramente inferiores aos máximos valores dos hidrogramas de projeto, em função dos efeitos de translação da onda de cheia, tanto no espaço quanto no tempo. A Figura 45 mostra o perfil do rio Jaguari, enquanto a Figura 46 mostra um detalhe junto à região da ponte do Passo da França para as vazões de projeto de 100 e 350 anos. Os níveis d'água junto às seções transversais de montante, eixo e jusante da ponte são exibidas da Figura 47 até a Figura 49 para as vazões de projeto. A mancha de inundação para o tempo de retorno de 100 anos é apresentada na Figura 50 e na Figura 51 para 350 anos.

Figura 45. Perfil longitudinal do rio Jaguari, mostrando a linha d'água para os tempos de retorno de 100 e 350 anos de recorrência.



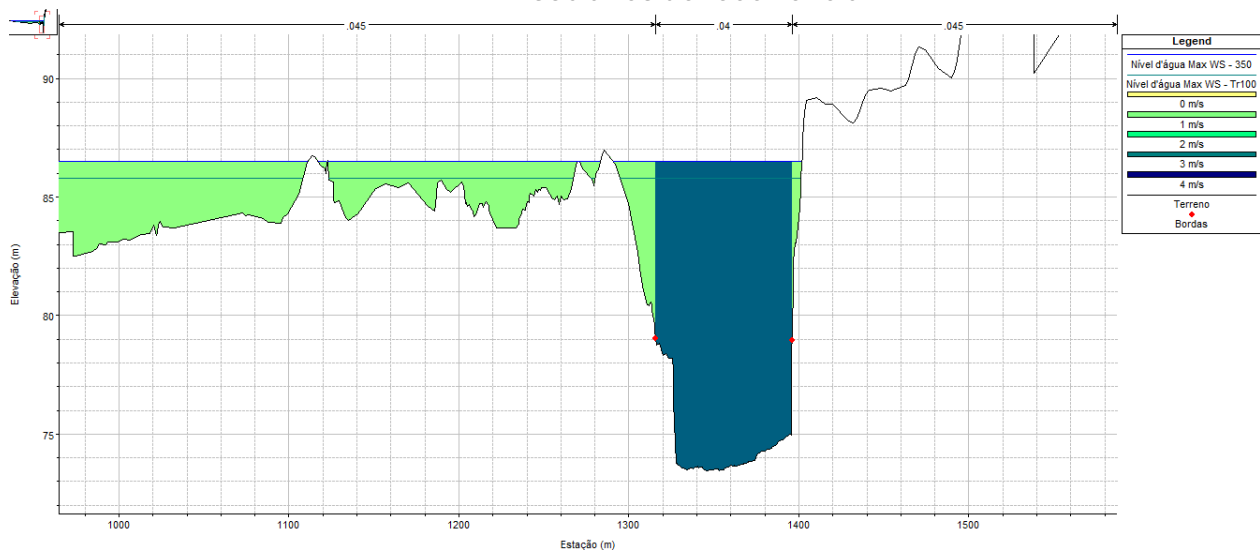
Fonte: Elaboração própria.

Figura 46. Perfil longitudinal do rio Jaguari na ponte do Passo da França, mostrando a linha d'água para os tempos de retorno de 100 e 350 anos de recorrência.



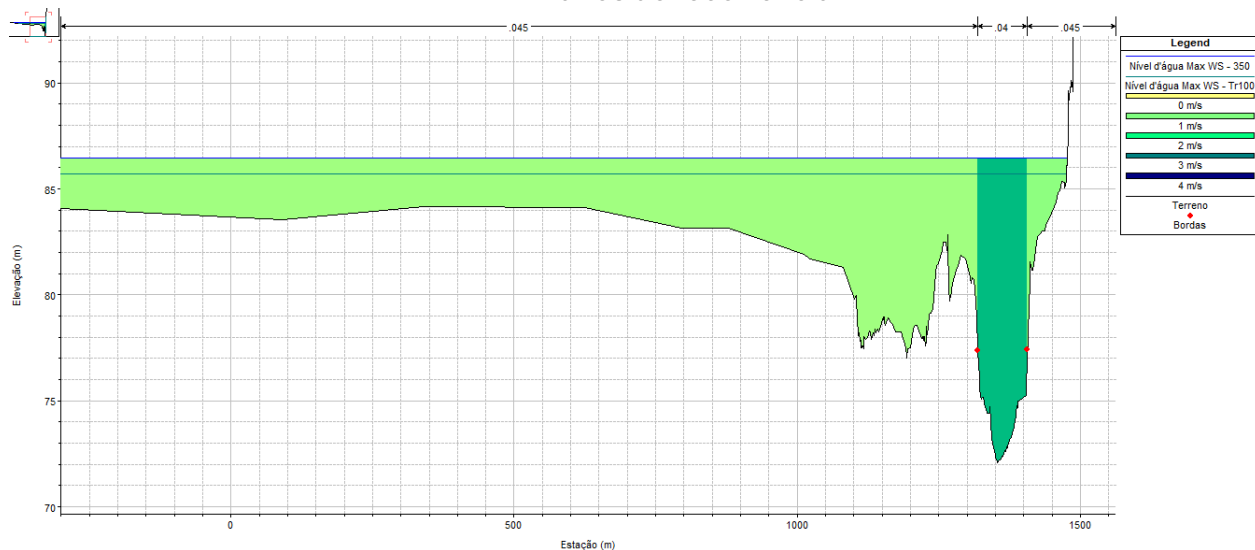
Fonte: Elaboração própria.

Figura 47. Seção transversal a montante do eixo da ponte Passo da França no rio Jaguari para a vazão de 100 e 350 anos de recorrência. Distribuição de velocidades para 350 anos de recorrência.



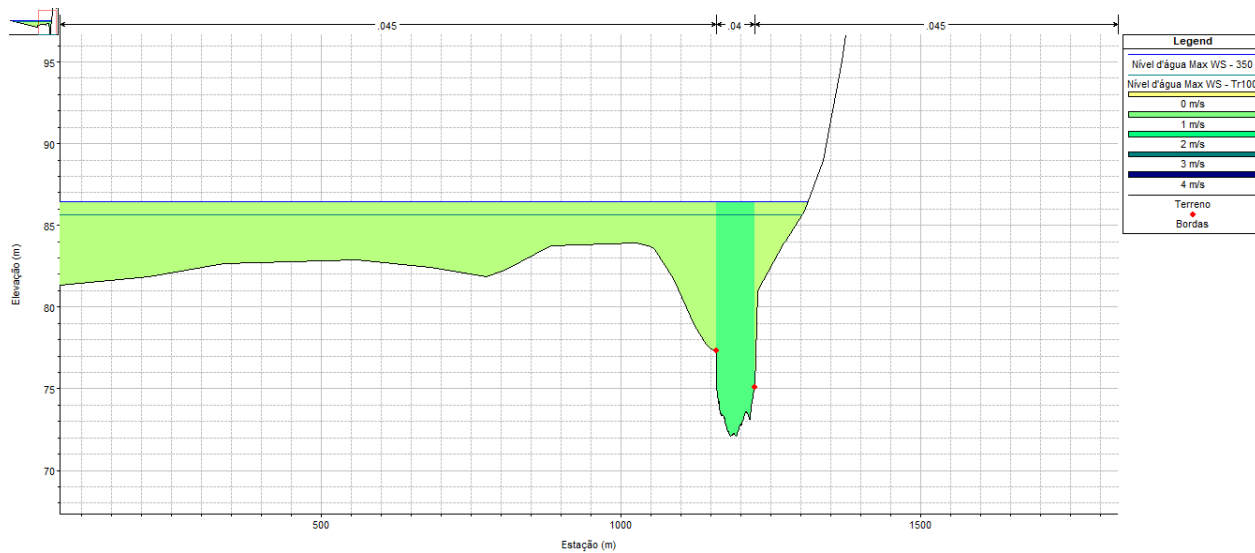
Fonte: Elaboração própria.

Figura 48. Seção transversal no eixo da ponte do Passo da França no rio Jaguari para a vazão de 100 e 350 anos de recorrência. Distribuição de velocidades para 350 anos de recorrência.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 49. Seção transversal a jusante do eixo da ponte do Passo da França no rio Jaguari para a vazão de 100 e 350 anos de recorrência. Distribuição de velocidades para 350 anos de recorrência.

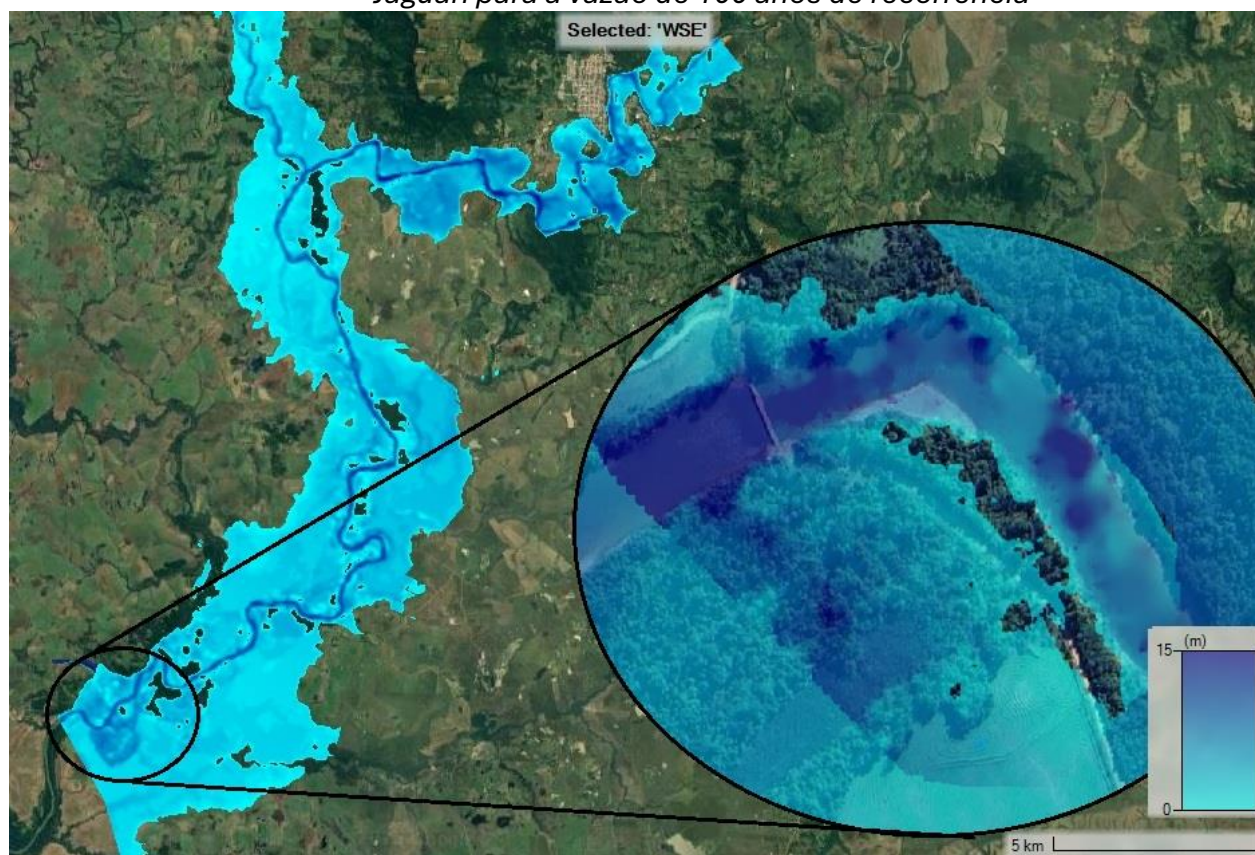


Fonte: Elaboração própria.

Tabela 10. Informações de indicadores hidráulicos obtidos durante a simulação das vazões de projeto de 100 e 350 anos de tempo de retorno resultante da modelagem no HEC-RAS

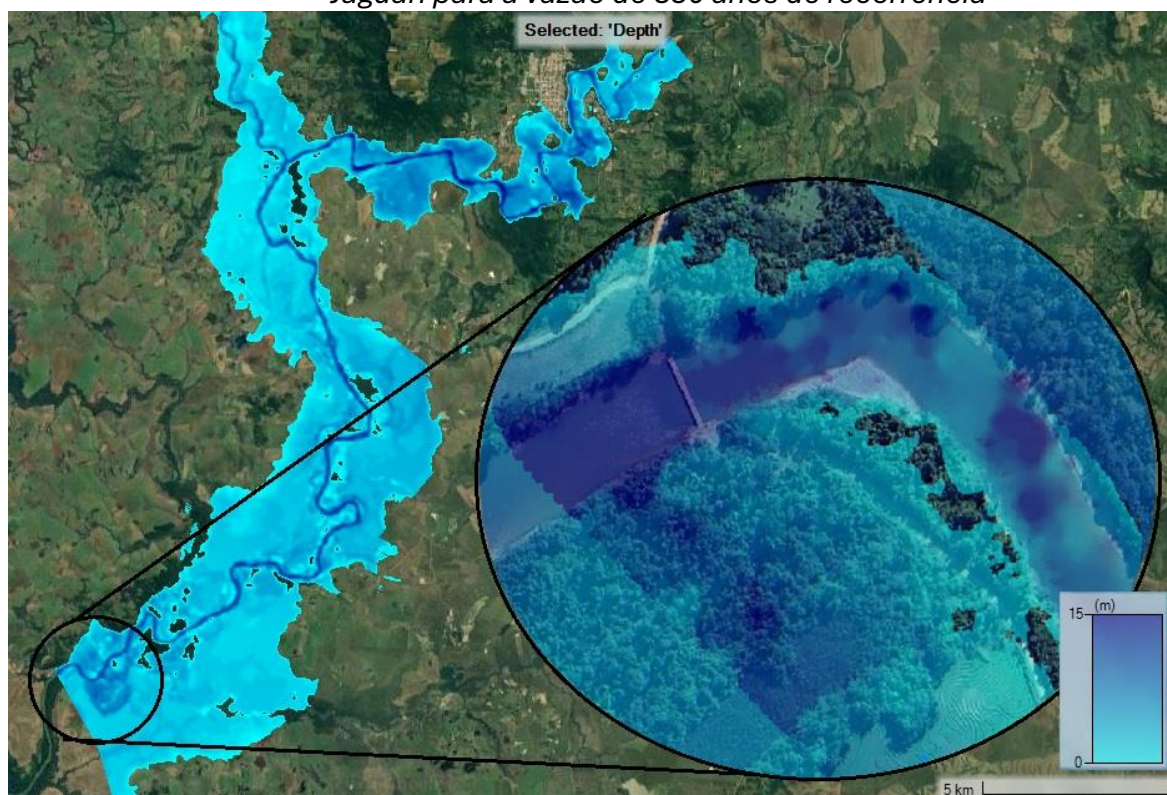
TR (anos)	Seção do arroio com relação à ponte	Vazão (m ³ .s-1)	Cota d'água (m)	Velocidade média na calha (m.s ⁻¹)	Seção de escoamento (m ²)	Largura da superfície de escoamento (m)	Número de Froude
100	Montante	6569,57	85,81	3,46	5046,35	2964,71	0,33
	Eixo	6569,55	85,69	2,61	6582,63	2994,98	0,24
	Jusante	6569,47	85,64	1,31	11900,26	3383,59	0,12
350	Montante	8708,69	86,50	3,26	7291,95	3512,6	0,3
	Eixo	8708,56	86,47	2,52	9149,21	3581,17	0,23
	Jusante	8708,52	86,43	1,37	14638,55	3633,96	0,12

Figura 50. Mancha de inundação simulada na região da ponte do Passo da França no rio Jaguari para a vazão de 100 anos de recorrência



Fonte: Elaboração própria

Figura 51. Mancha de inundação simulada na região da ponte do Passo da França no rio Jaguari para a vazão de 350 anos de recorrência



Fonte: Elaboração própria

A partir dos resultados obtidos na simulação dos eventos de projeto destacam-se velocidades máximas de $3,46 \text{ m.s}^{-1}$ para o tempo de retorno de 100 anos e de $3,26 \text{ m.s}^{-1}$ para 350 anos, este último superior ao valor obtido no processo de calibração para o evento de cheia de Abril-Maio de 2024. O regime de escoamento na região é subcrítico, caracterizado por baixas velocidades, típicas de região de várzea, onde se observou aumento de velocidade na região a montante do eixo da ponte, onde o perfil de fundo do rio adquire maior declividade. Em função da possibilidade de alteração da característica das seções transversais do rio junto à região onde a ponte será reconstruída, recomenda-se que o projeto executivo final seja acompanhado de um levantamento topobatimétrico atualizado, incluindo um levantamento a montante, por pelo menos 15 km a montante e a jusante do eixo do projeto da ponte. Isso permitirá uma melhor caracterização das seções transversais do arroio em estudo final, e ajudará a verificar a ocorrência de fenômenos hidráulicos.

9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo hidrológico apresentado neste relatório foi desenvolvido visando determinar a cota de cheia e velocidades a serem utilizadas como referência para o anteprojeto da ponte da localidade de Passo da França, sobre o rio Jaguari, na divisa entre os municípios de São Vicente do Sul e São Francisco de Assis. O estudo se baseou nas 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, além das recomendações de Adequação dos critérios de projeto seguindo as recomendações feita pelo Governo do RS, para garantir a resiliência climática das estruturas. Assim, foram avaliadas as cheias observadas em Abril e Maio de 2024 e as de projeto para os tempos de retorno de 100 anos, de acordo com a IS-121/21, e 350 anos, de acordo com a recomendação do governo do RS para adequação dos critérios de projeto.

Foi estimada a cota da cheia de 85,70 m para a inundação ocorrida em Abril-Maio de 2024, 85,69 m para o evento de projeto com 100 anos de tempo de retorno, e 86,47 m para o evento com tempo de retorno de 350 anos. As velocidades médias do escoamento para as vazões observadas em Abril-Maio de 2024, evento de projeto de 100 anos e 350 anos de tempo de retorno foram, respectivamente, $2,62 \text{ m.s}^{-1}$, $2,61 \text{ m.s}^{-1}$ e $2,52 \text{ m.s}^{-1}$, já na seção de montante observou-se velocidades superiores, chegando respectivamente a $3,84 \text{ m.s}^{-1}$, $3,46 \text{ m.s}^{-1}$ e $3,26 \text{ m.s}^{-1}$.

Isso indica que, para o projeto dessa ponte, caso não forem seguidas as recomendações relativas à adaptação para mudanças climáticas, com a majoração do evento de projeto para 350 anos, devem ser utilizadas as condicionantes de escoamento provocadas pelo evento de Abril e Maio de 2024 para o projeto da ponte - conforme recomenda a nota do IPH (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).

O estudo hidrológico desenvolvido nesse documento é com base na orientação de locação recebida sobre o anteprojeto da ponte, e deve ser avaliada a necessidade da sua complementação, na ocasião de elaboração do projeto executivo. Informações da estrutura da ponte como a presença de pilares e construção de cabeceiras com aterro em rampas alteram as características da seção transversal do rio, e a influência desses elementos deve ser considerada em nova análise, em função do impacto na hidrodinâmica do escoamento.

Complementarmente, se recomenda que, durante os estudos do projeto executivo, seja realizada a implantação de um RN fixo a ser utilizado durante a construção da ponte e estudos correspondentes, pois não existe RN no local e, em razão do curto tempo para realização deste estudo, não foi possível a implantação de um formal, embora tenha sido feito o levantamento com topografia de alta precisão. Ainda, um RN no local facilitaria tarefas futuras de auscultação e verificações de deflexões ao longo da vida útil da estrutura.

Por fim, considerando as incertezas inerentes ao processo de modelagem chuva-vazão, se recomenda a instalação de pluviômetro e régua limnimétrica no local com monitoramento diário, a construção de uma base de dados, e a atualização desses estudos periodicamente a partir das informações levantadas, especialmente por meio das estatísticas de cotas e vazões.

10. 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
Enga. Yamila Chicherit	Engenheira Hídrica	Especialista em modelagem hidrológica e hidráulica
Eng. Rodrigo Girardon Della Pace	Eng. Ambiental e Sanitarista	Especialista em geoprocessamento

Santa Maria, 11 de Fevereiro de 2025.

Prof. Eng. Daniel Gustavo Allasia Piccilli

CREA RS150106
RNP 2208597869

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allasia, D.G.; Tassi, R.; Horn, J.F.C.; et al. Estudo Hidrológico para o Desenvolvimento Dos Anteprojetos de Engenharia para a Reconstrução de Pontes - Dispensa de Licitação Nº 117/2024. Lote nº 02 - REC-RS-4316907-20240517-06. Meta nº 4 - Ponte do Toaldo. Arroio Lobato - Município de Santa Maria, 2024.

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.

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>.

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>

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.

BORTOLIN, T. A.; REGINATO, P. A. R.; LEO, 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.

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

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

Collischonn et al. Unprecedented April-May 2024 rainfall in South Brazil sets new record. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. RBRH, Porto Alegre, v. 29, e50, 2024.

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.

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.

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. 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>. Acesso em: 10 janeiro de 2024.

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.

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..

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.

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.

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

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.

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

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.

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).

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.

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.

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>

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.

Solos do Rio Grande do Sul /

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.

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

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

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

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>.

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: https://www.researchgate.net/publication/265806562_Compartimentacao_geomorfologica

a_da_bacia_hidrografica_do_Ibicui_Rio_Grande_do_Sul_Brasil_proposta_de_classificacao
[accessed Oct 05 2024].

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. Protocolo 110 - 30/05/2007.

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.77-80, 1985.

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.

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.

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.

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)

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>. Acesso em: 10 de outubro de 2024..

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