

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**IDENTIFICAÇÃO DE LIMIARES DE PRECIPITAÇÃO CAUSADORES DE  
INUNDAÇÃO EM BACIAS DE PEQUENA ESCALA: ESTUDO DE CASO PARA O  
RIBEIRÃO JOSÉ PEREIRA, ITAJUBÁ/MG**

**GABRIELA DOS SANTOS BARBOZA**

**ITAJUBÁ-MG**

**2024**

**GABRIELA DOS SANTOS BARBOZA**

**IDENTIFICAÇÃO DE LIMIARES DE PRECIPITAÇÃO CAUSADORES DE  
INUNDAÇÃO EM BACIAS DE PEQUENA ESCALA: ESTUDO DE CASO PARA O  
RIBEIRÃO JOSÉ PEREIRA, ITAJUBÁ/MG**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

**Área de Concentração:** Meio Ambiente e Recursos Hídricos

**Orientador:** Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva

**ITAJUBÁ-MG**

**2024**

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, expresso minha profunda gratidão a Deus pela orientação sábia ao longo do meu percurso e pela dádiva da saúde que me permitiu trilhar este caminho.

À minha família, Adriana dos Santos, Marcos Duarte Tavares e Luiza Tavares expresso meu profundo agradecimento pelo inestimável apoio, pela constante segurança proporcionada e pela dedicação incansável ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

Ao meu namorado Tulio Janovik pelo apoio, amor, compreensão e por ter embarcado na missão de viver longe juntamente comigo.

Ao meu orientador, Benedito Cláudio da Silva, expresso minha sincera gratidão por todo o suporte, valiosos ensinamentos e as conversas enriquecedoras que contribuíram para minha evolução pessoal e profissional ao longo desses dois anos.

Ao Programa e a todos os professores do POSMARH, os meus agradecimentos pela oportunidade de absorver os melhores conhecimentos técnicos em cada aula, encontro e evento em que participei. Essa experiência foi fundamental para meu crescimento acadêmico.

Aos amigos e colegas do POSMARH, agradeço por suas contribuições significativas em minha jornada acadêmica. O apoio e a troca de conhecimentos foram elementos essenciais para o meu desenvolvimento.

Ao município de Itajubá/MG, que gentilmente se tornou minha casa durante dois anos, expresso minha gratidão pelos laços feitos e pelas experiências enriquecedoras que levarei para toda a vida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), agradeço pela disponibilização de bolsas de estudo no projeto, que possibilitaram minha dedicação exclusiva à titulação. Essa oportunidade foi fundamental para o sucesso dessa jornada acadêmica.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento do projeto Sistema de Alerta de Inundações em Bacias Hidrográficas de Pequenas Escala sob Influência de Expansão Urbana (APQ-01598-21), ao qual esta dissertação está vinculada.

*“O progresso é impossível sem mudança, e aqueles que não conseguem mudar suas mentes não conseguem mudar nada”*

George Bernard Shaw

## RESUMO

Os eventos extremos, como inundações e enchentes, têm aumentado globalmente, causando danos expressivos. No Brasil, essa preocupação é agravada pelas mudanças climáticas, com fenômenos como La Niña em 2022 e El Niño até 2024. O Ribeirão José Pereira, em Itajubá/MG, atravessa a área urbana e é suscetível a cheias. Este estudo tem como objetivo estabelecer limiares de precipitação que desencadeiam inundações na Bacia Hidrográfica Ribeirão José Pereira. Para isso, realizou-se a caracterização da bacia, considerando dados de clima, histórico de inundações, topografia, solos, uso do solo e subdivisão em sub-bacias. Posteriormente, calcularam-se parâmetros como coeficiente de curva (CN), tempo de concentração e *lag time*. Em seguida, foi possível selecionar dois eventos de inundação no período chuvoso de 2022 e 2023 para calibrar o modelo HEC-HMS, utilizando dados de nível e precipitação de estações disponíveis na bacia. Além disso, a calibração dos parâmetros buscou um ajuste aceitável entre dados observados e simulados. Com base nisso, escolheram-se eventos para simulação a partir de um acumulado mínimo diário, selecionados dos registros da série histórica de 2013 a 2023 da estação pluviométrica da UNIFEI-CEPREMG. Para definição desse valor mínimo, realizou-se análise de chuva máxima e cálculos de tempo de retorno, indicando o valor de 40 mm em 24 horas. Esses eventos evidenciaram chuvas concentradas e distribuídas, destacando a influência das bacias a montante na variação dos níveis do ribeirão durante eventos de inundação. A análise detalhada revelou que a precipitação significativa ocorre entre os primeiros 25% e 50% da duração total das chuvas desencadeadoras de transbordamento ou inundação. A partir das simulações, identificou-se o acumulado mínimo de chuva necessário para ultrapassar 1,5m no Ribeirão. Através das simulações, determinou-se o volume mínimo de chuva acumulado necessário para exceder a marca de 1,5m no Ribeirão. A análise do gráfico resultante, juntamente com a curva logarítmica derivada do acumulado mínimo em cada evento selecionado, revelou que ao atingir 34,60mm de precipitação acumulada, independentemente da duração e distribuição da chuva, torna-se essencial emitir um alerta.

**Palavras-chave:** Bacia hidrográfica Ribeirão José Pereira. Inundações. Limiares de chuva. Modelagem hidrológica.

## ABSTRACT

Extreme events, such as flash flood, have increased globally, causing significant damage. In Brazil, this concern is worsened by climate change, with phenomena such as La Niña in 2022 and El Niño until 2024. José Pereira river, in Itajubá/MG, crosses the urban area and is susceptible to flooding. This study aims to establish precipitation thresholds that trigger floods in the José Pereira river basin. To this end, the basin was characterized, considering climate data, flood history, topography, soil, land use and subdivision into sub-basins. Subsequently, parameters such as curve coefficient (CN), concentration time and lag time were calculated. It was then possible to select two flood events in the rainy season of 2022 and 2023 to calibrate the HEC-HMS model, using level and precipitation data from stations available in the basin. Furthermore, parameter calibration sought an acceptable fit between observed and simulated data. Based on this, events were chosen for simulation based on a minimum daily accumulation, selected from the historical series records from 2013 to 2023 from the UNIFEI-CEPREMG rainfall station. To define this minimum value, maximum rainfall analysis and return time calculations were carried out, indicating a value of 40 mm in 24 hours. These events demonstrated concentrated and distributed rainfall, highlighting the influence of upstream basins on the variation in river levels during flood events. Detailed analysis revealed that significant precipitation occurs between the first 25% and 50% of the total duration of rainfall triggering overflow or flooding. From the simulations, the minimum accumulated rainfall necessary to exceed 1.5m in river was identified. Through simulations, the minimum volume of accumulated rain necessary to exceed the 1.5m mark in river was determined. Analysis of the resulting graph, together with the logarithmic curve derived from the minimum accumulation in each selected event, revealed that upon reaching 34.60mm of accumulated precipitation, regardless of the duration and distribution of the rain, it becomes essential to issue an alert.

**Key-words:** José Pereira river. Floods. Rain thresholds. Hydrological modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Limiar de precipitação acumulada combinação com indicação de alerta	21
Figura 2 – Curvas de probabilidade de excedência de chuva de HUFF	27
Figura 3 – Aplicabilidade fórmulas de tempo de concentração ( $T_c$ )	31
Figura 4 – Coleta de dados por meio do sensoriamento remoto orbital	33
Figura 5 - Fluxograma conceitual do estudo na BHRJP	41
Figura 6 – Mapa de localização	42
Figura 7 – Precipitações e temperaturas médias para a cidade de Itajubá	43
Figura 8 – Inundações ocorridas na BHRJP em fevereiro de 2023	45
Figura 9 – Mapa hipsométrico da BHRJP	46
Figura 10 - Mapa de declividade da BHRJP	47
Figura 11 – Mapa de Solos da BHRJP	48
Figura 12 – Mapa de Uso e Cobertura do Solo da BHRJP	49
Figura 13 – Localização das estações hidrometeorológicas localizadas na BHRJP	55
Figura 14 – Chuvas diárias máximas anuais no município de Itajubá (Composição das séries históricas dos postos Itajubá e São João de Itajubá)	59
Figura 15 – Sub-bacias da BHRJP	66
Figura 16 – Valores de CN para a BHRJP	68
Figura 17 – Valores de CN médio para a cada sub-bacia da BHRJP	69
Figura 18 – Dados de observados e dados distribuição Log-Normal	73
Figura 19 – Comparativo de chuvas observadas com a desagregação da distribuição log-normal para 2, 3, 6 e 24h	74
Figura 20 – Dados do evento de cheia em 18/10/2022	75
Figura 21 – Dados do evento de cheia em 23/01/2023	75
Figura 22 – Evento 18/10/2022 simulado no HEC-HMS com parâmetros iniciais	79
Figura 23 – Evento 18/10/2022 simulado no HEC-HMS com parâmetros calibrados	81
Figura 24 – Evento 23/01/2023 simulado no HEC-HMS com parâmetros calibrados para evento do dia 18/10/2022	82
Figura 25 – Evento 23/01/2023 com parâmetros calibrados no HEC-HMS	84
Figura 26 – (A) evento 21/01/2021, (B) evento 11/03/2023, (C) evento 03/01/2021, (D) evento 15/12/2015, (E) evento 27/01/2016, (F) evento 03/02/2017, (G) evento 27/02/2023	90
Figura 27 – Gráfico adimensional de chuva acumulada com distribuição temporal para eventos concentrados	91

Figura 28 – (A) evento 08/10/2019, (B) evento 06/03/2021, (C) evento 09/03/2015, (D) evento 10/11/2017, (E) evento 15/01/2016 (F) evento 27/10/2021	93
Figura 29 – Gráfico adimensional de chuva acumulada com distribuição temporal para eventos não concentrados	95
Figura 30 – Análise adimensional de distribuição temporal de chuvas na faixa de 46,60mm à 63mm em 24 horas que indicaram inundação	96
Figura 31 – Análise adimensional de distribuição temporal de chuvas na faixa de 46,60mm à 63mm em 24 horas que não indicaram inundação	97
Figura 32 – Evento 29/02/2017	98
Figura 33 – Evento 03/10/2021	98
Figura 34 – Gráfico de limiares de precipitação desencadeadoras de inundação na BHRJP	99



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limiares de chuva e duração para eventos extremos adotados na literatura para diferentes regiões do Brasil	22
Tabela 2 – Coeficientes de desagregação para diferentes tempos e durações de chuva	29
Tabela 3 – Tempo de retorno para cada tipo de ocupação de área	30
Tabela 4 – Aplicabilidade fórmulas de Tc	31
Tabela 5 – Modelos mais utilizados de acordo com sua classificação	37
Tabela 6 – Modelos hidrológicos utilizado na literatura de acordo com área de drenagem semelhante à BHRJP	38
Tabela 7 – Classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras	52
Tabela 8 – Classificação hidrológica do solo para BRJP	53
Tabela 9 – CN para bacias hidrográficas urbanas	53
Tabela 10 – Estações hidrológicas localizadas na BHRJP	56
Tabela 11 – Fórmulas de Tc recomendadas	57
Tabela 12 – Valores de N da equação de Kerby-Hathaway	58
Tabela 13 – Valores recomendados de performance para simulações	64
Tabela 14 – Informações das sub-bacias	66
Tabela 15 – CN Sub-bacias	70
Tabela 16 – Tempo de concentração (Tc) em minutos para a BHRJP	71
Tabela 17 – Tempo de concentração (Tc) em minutos para cada sub-bacia	71
Tabela 18 – Descrição dos eventos utilizados para calibração	74
Tabela 19 – Dados pluviométricos das estações no dia 23/01/2023	76
Tabela 20 – Parâmetros iniciais da sub-bacia para calibração no evento 18/10/2022	78
Tabela 21 – Parâmetros dos trechos de rio para calibração no evento 18/10/2022	78
Tabela 22 – Parâmetros calibrados para o evento 18/10/2022	80
Tabela 23 – Parâmetros dos trechos de rio para calibração no evento 18/10/2022	81
Tabela 24 – Parâmetros calibrados para o evento 23/10/2023	83
Tabela 25 – Parâmetros dos trechos de rio para calibração no evento 23/01/2023	84
Tabela 26 - Parâmetros calibrados de CN e <i>lag time</i> para a BHRJP	85
Tabela 27 - Parâmetros calibrados de coeficiente de Manning, fluxo de base e largura de trecho de rio para a BHRJP.	85
Tabela 28 – Eventos registrados potencialmente causadores de inundação na BHRJP	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
API	Interface de Programação de Aplicações
BHRJP	Bacia Hidrográfica Ribeirão José Pereira
CEMADEM	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DRM – RJ	Departamento de Recursos Minerais do Rio de Janeiro
EM	Erro Médio
EP	Erro Padrão
FEPI	Faculdade de Engenharia de Itajubá
FFG	<i>Flash Flood Guidance</i>
GPM	<i>Global Precipitation Measurement</i>
HEC – HMS	<i>Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índices de circularidade
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Kf	Fator de forma
ONU – UNDRR	Organização das Nações Unidas
PPDC	Plano de Prevenção a Desastres
SALVAR	Sistema Automático de Visualização de Riscos
Tc	Tempo de concentração
TR	Tempo de Retorno
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
UHE	Elementos Hidrológicos
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1 Objetivo Geral .....	16
2.2 Objetivos Específicos .....	16
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Introdução à hidrologia de bacias de pequena escala .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Desafios específicos em bacias de pequena escala.....</b>	<b>18</b>
<b>3.3 Inundações em bacias hidrográficas urbanizadas de pequena escala .....</b>	<b>19</b>
<b>3.4 Limiares de chuva causadoras de inundação .....</b>	<b>20</b>
<b>3.5 Parâmetros Hidrológicos .....</b>	<b>24</b>
3.5.1 Vazão de Projeto.....	24
3.5.2 Tempo de Retorno.....	29
3.5.3 Tempo de Concentração.....	30
<b>3.6 Monitoramento de inundações .....</b>	<b>32</b>
<b>3.7 Modelagem hidrológica .....</b>	<b>35</b>
3.7.1 Modelo HEC-HMS.....	39
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>41</b>
<b>4.1 Bacia hidrográfica Ribeirão José Pereira .....</b>	<b>42</b>
4.1.1 Caracterização da área de estudo.....	42
4.1.2 Histórico de inundações.....	44
4.1.3 Hipsometria e declividade.....	45
4.1.4 Solos.....	47
4.1.5 Uso e ocupação do solo.....	49
4.1.6 Subdivisão da bacia hidrográfica.....	50
<b>4.2 Cálculo da curva número (CN) .....</b>	<b>51</b>
<b>4.3 Coleta e análise dos dados hidrometeorológicos.....</b>	<b>54</b>
4.3.1 Estações pluviométricas e fluviométricas na bacia hidrográfica.....	54
4.3.2 Tempo de concentração.....	56
4.3.3 Análise de chuvas máximas.....	58
<b>4.4 HEC-HMS .....</b>	<b>60</b>
4.4.1 Calibração do modelo.....	60
4.4.1.1 Modelo de Bacia.....	60

4.4.1.2 Modelo Meteorológico.....	60
4.4.1.3 Especificações de controle.....	61
4.4.1.4 Eventos selecionados para calibração do modelo.....	61
4.4.1.5 Dados de série temporal.....	62
4.4.1.5.1 Precipitação.....	62
4.4.1.4.2 Vazão.....	62
4.4.1.6 Ajustando parâmetros no HEC-HMS.....	63
4.4.2 Simulação de eventos de inundação.....	63
<b>4.5 Limiares de inundação .....</b>	<b>64</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>66</b>
<b>5.1 Discretização hidrológica e dados de entrada do modelo .....</b>	<b>66</b>
5.1.1 Subdivisão da bacia hidrográfica.....	66
5.1.2 Cálculo da Curva Número (CN) .....	67
5.1.3 Tempo de Concentração.....	70
5.1.4 Chuvas intensas na bacia.....	72
<b>5.2 HEC-HMS .....</b>	<b>74</b>
5.2.1 Calibração do modelo.....	74
5.2.1.1 Eventos selecionados para calibração do modelo.....	74
5.2.1.2 Ajustando parâmetros no HEC-HMS.....	77
5.2.1.2.1 Evento 18/10/2022.....	77
5.2.1.2.2 Evento 23/01/2023.....	82
5.2.2 Simulação dos eventos potencialmente deflagradores de inundação.....	86
5.2.2.1 Simulação de eventos concentrados.....	89
5.2.2.2 Simulação de eventos distribuído ao longo das 24 horas	94
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>101</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>103</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os eventos extremos como inundações e enchentes, são fenômenos que têm se intensificado nas últimas décadas em todo o mundo, causando perdas humanas e econômicas significativas. De acordo com um relatório publicado pela Organização das Nações Unidas (ONU - UNDRR) (2021) mais de 4100 desastres naturais foram registrados em 2020, sendo que 90% deles foram relacionados ao clima.

No Brasil, as inundações, enchentes e eventos extremos de precipitação têm sido uma preocupação constante nos últimos anos. De acordo com Mendonça e Cavalcanti (2021), em 2020, o país enfrentou a maior seca em 90 anos na região do Pantanal, que resultou em incêndios florestais sem precedentes. No mesmo ano, a região Sudeste foi atingida por fortes chuvas que causaram inundações e deslizamentos de terra, resultando em mortes e danos materiais significativos. Em 2021, a região Norte do país sofreu com a cheia dos rios, que causou inundações em diversas cidades e comunidades ribeirinhas.

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (2023), através de um informe anual da Conjuntura dos Recursos Hídricos descreve uma visão abrangente da gestão e situação dos recursos hídricos no Brasil, destacando informações sobre disponibilidade hídrica, qualidade da água, usos do recurso e ações para assegurar a segurança hídrica. O relatório apontou que mais de 1,5 milhão de pessoas foram impactadas por cheias em 2022. Paralelamente, cerca de 7 milhões de pessoas sofreram com secas e estiagens, desse total aproximadamente 50% delas residem no Nordeste, região que concentrou 45% dos registros desse tipo de fenômeno no país.

Além disso, no documento da Conjuntura dos Recursos Hídricos é destacada uma intensificação marcante nos eventos climáticos extremos. O fenômeno La Niña em 2022, seguido pelo El Niño até o início de 2024, resultou em condições climáticas extremas, marcadas por um acentuado período de seca no Norte e Nordeste, contrastando com chuvas intensas no Sul. No Sudeste e Centro-Oeste do Brasil são registradas ondas de calor intenso. A interação do El Niño com o aquecimento das águas do Oceano Atlântico Tropical Norte contribuiu para esses eventos extremos. Essas variações climáticas apresentam desafios significativos para a gestão hídrica, com impactos diretos na disponibilidade de água nessas regiões.

O Ribeirão José Pereira é um importante curso d'água localizado em Itajubá, no estado de Minas Gerais, que apresenta desafios devido às suas características geográficas e climáticas com histórico extenso de alta pluviosidade, influenciando na ocorrência frequente de inundações (SILVA et al., 2019). De acordo com Gomes (2020) o ribeirão é propenso a sofrer

com cheias e enchentes, especialmente durante o período chuvoso, que abrange os meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Nos últimos anos, a região tem enfrentado um aumento na frequência e intensidade desses eventos, causando danos materiais e humanos (SANTOS, 2021).

Para isso, a modelagem hidrológica associada às ferramentas de geoprocessamento torna-se importante na gestão de riscos de inundações e enchentes. Esses modelos permitem aos engenheiros e especialistas em recursos hídricos avaliar as possíveis consequências de uma inundação e cheias, planejar medidas de prevenção e mitigação e tomar decisões para reduzir os riscos de inundações (SHARMA e TIWARI, 2017). Além disso, são consideradas técnicas avançadas que utilizam simulações para representar o comportamento da água em uma bacia hidrográfica ou em um sistema de drenagem urbana. Esses modelos levam em consideração diversos fatores, como a topografia, a vegetação, a precipitação, a evaporação e a infiltração do solo. Com base nessas informações, são projetados sistemas de drenagem mais eficientes, planeja-se o uso do solo e recomenda-se medidas de prevenção e mitigação para minimizar os riscos de inundações e enchentes (KUNDZEWICZ et al., 2018).

De acordo com Medeiros (2013), no contexto de um sistema de alerta, destacam-se elementos como o monitoramento hidrológico, a avaliação dos níveis dos rios e dados pluviométricos, análise de dados meteorológicos, a modelagem hidrológica e previsão e posteriormente, transmissão de informações para à Defesa Civil, prefeituras e entidades envolvidas na gestão de desastres para emissão dos boletins. Contudo, para assegurar a eficácia da modelagem hidráulica e do sistema de alerta, é necessário contar com parâmetros devidamente calibrados. O aspecto mais crucial reside na estimativa precisa de limiares de chuva e as cotas que indicam alterações nos níveis do rio sob investigação. Tais limiares são variáveis, dependendo da intensidade e padrão de chuvas na região, segmento dos rios e características fisiográficas da bacia, elementos fundamentais incorporados ao modelo hidrológico.

A implementação de sistemas de alerta de inundações devidamente calibrados proporciona a autoridades e comunidades acesso a informações em tempo real sobre os níveis de água, possibilitando a adoção de medidas preventivas, como a evacuação de áreas de risco (ZHANG et al., 2021). Além disso, fornecem o conhecimento detalhado sobre a intensidade e a duração de uma chuva, bem como a localização das áreas mais vulneráveis. Com isso, as autoridades planejam melhor as respostas, como a mobilização de equipes de emergência, o redirecionamento do tráfego, a evacuação preventiva e outras ações que possam reduzir os

impactos negativos das enchentes, preparando-se para enfrentar os riscos associados a eventos climáticos extremos (FENG et al., 2017).

Nesse sentido, é crucial desenvolver abordagens eficazes para enfrentar esses desafios, englobando a precisa calibração dos limiares de chuva na bacia hidrográfica. Essa ação não apenas facilita a implementação de estratégias adaptativas e mitigadoras, mas também desempenha um papel fundamental em iniciativas como projetos de infraestrutura, planejamento territorial e gestão integrada de recursos hídricos. Tais soluções apresentam o potencial de minimizar os efeitos prejudiciais das enchentes urbanas, promovendo, assim, cidades mais resilientes e sustentáveis (OLIVEIRA et al., 2022).

Portanto, o presente trabalho busca identificar limiares de precipitação desencadeadores de inundações na Bacia Hidrográfica Ribeirão José Pereira, utilizando modelagem hidrológica por meio da associação do software HEC-HMS e ferramentas de geoprocessamento, identificando quais áreas da bacia hidrográfica são mais afetadas e propor metodologias e diretrizes de monitoramento na bacia hidrográfica.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste estudo é estabelecer limiares de precipitação-duração que possam desencadear cenários de inundações na Bacia Hidrográfica Ribeirão José Pereira localizada em Itajubá/MG.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Com o intuito de guiar a metodologia e alcançar o objetivo principal, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar uma análise do histórico de inundações na Bacia Hidrográfica Ribeirão José Pereira, identificando eventos passados e compreendendo os padrões temporais e espaciais dessas ocorrências.
- b) Realizar a caracterização fisiográfica da BHRJP para identificação dos parâmetros para ajuste como CN, Tc e TR.
- c) Ajustar o modelo hidrológico HEC-HMS à bacia, utilizando dados de eventos com registros detalhados de precipitação e níveis d'água.
- d) Realizar simulações no HEC-HMS utilizando registros de chuvas intensas na bacia, a fim de avaliar as quantidades de chuva e o tempo necessário para desencadear eventos de inundação.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Introdução à hidrologia de bacias de pequena escala

Pequenas bacias hidrográficas, embora muitas vezes não tão evidenciadas em comparação com suas contrapartes de grande extensão, desempenham um papel crucial na dinâmica hídrica local e regional. No contexto hidrológico, Tucci (2005) propõe uma classificação das escalas de bacias com base na extensão de suas áreas de drenagem. Segundo essa abordagem, bacias consideradas de pequena escala compreendem áreas de drenagem de até 100 km<sup>2</sup>, enquanto aquelas classificadas como médias escala abrangem uma faixa entre 100 km<sup>2</sup> e 1000 km<sup>2</sup>. Por outro lado, as bacias de grande escala englobam regiões com uma área de drenagem que excede 1000 km<sup>2</sup>.

De acordo com Tucci (2003), essas bacias, definidas por sua pequena área de drenagem, apresentam uma resposta mais sensível às mudanças ambientais, resultando em impactos significativos no escoamento superficial. Esses fatores ressaltam a importância de compreender as características específicas das pequenas bacias, como área de drenagem e também as particularidades do solo, vegetação e topografia. Lima (1996) categoriza as bacias em grandes e pequenas, destacando que as alterações no escoamento superficial se manifestam de forma mais acentuada em bacias menores. Goldenfum (2003) ressalta a subjetividade na definição do tamanho de uma bacia pequena, devido à diversidade de características físicas entre diferentes bacias. Ponce (1989) adiciona critérios específicos, como a duração das chuvas ultrapassando o tempo de concentração da bacia, para classificar uma bacia como pequena.

Machado e Torres (2012) abordam a diversidade de formas nas pequenas bacias, influenciadas pela estrutura geológica. Índices como o de circularidade ( $I_c$ ) e o fator de forma ( $K_f$ ) são fundamentais para descrever a morfologia das bacias, indicando riscos associados, como maior probabilidade de enchentes em bacias mais circulares. Este entendimento é vital para implementar estratégias de prevenção e gestão eficientes (ROCHA; ALVES et al., 2014).

Esses riscos associados a pequenas bacias incluem a suscetibilidade a enchentes e inundações devido à rápida resposta aos eventos climáticos. A previsão de limiares de chuvas e sua duração nessas bacias torna-se crucial para a mitigação desses riscos, permitindo a implementação de medidas preventivas e a gestão eficiente dessas áreas geográficas restritas. A compreensão desses limiares proporciona uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias que visam a resiliência e a sustentabilidade das comunidades afetadas por eventos extremos em pequenas bacias hidrográficas.

### 3.2 Desafios específicos em bacias de pequena escala

O monitoramento de variáveis com comportamento aleatório, tanto espacial quanto temporal, é essencial para compreender o comportamento hidrológico de uma região. A estimativa dessas variáveis depende de dados observados confiáveis, que devem representar diversas condições da região (TUCCI et al., 2012; REIS et al., 2008).

A Rede Hidrometeorológica Nacional, coordenada pela ANA, é responsável pelo monitoramento de dados de precipitação e vazão no Brasil. A Rede é composta por 4.633 estações pluviométricas e fluviométricas, que monitoram níveis e vazões de rios, quantidade de sedimentos e qualidade das águas. Contudo, seu foco está majoritariamente voltado para bacias de grande escala, com áreas superiores a 1000 km<sup>2</sup> (SOARES et al., 2010). Essa priorização acarreta em uma deficiência de dados históricos para pequenas bacias hidrográficas, representando um desafio considerável para o planejamento de recursos hídricos e obras de engenharia em muitas regiões do país.

A utilização extensiva de mecanismos de estimativa, transferindo dados de uma região para outra (WMO, 2008; GRANDRY et al., 2013), é uma resposta à falta de estações de monitoramento e séries históricas para pequenas bacias. Nesse contexto, métodos de regionalização de informações hidrológicas e modelos chuva-vazão são comumente empregados (PRUSKI et al., 2015; HORN, 2016; GPRH, 2012). Os métodos de regionalização, fundamentados na consideração das características climáticas e físicas da bacia, buscam compreender a distribuição espacial da vazão. Utilizando modelos de regressão, esses métodos estimam vazões em locais sem histórico de dados (OLIVEIRA, 2013). No entanto, a limitação da Rede Hidrometeorológica Nacional torna a utilização de métodos de regionalização pouco recomendada para pequenas bacias, especialmente aquelas com área inferior a 100 km<sup>2</sup> (SILVEIRA et al., 1998).

A simulação de séries temporais de dados de vazão por modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão, levando em conta as características fisiográficas da bacia, precipitação, evapotranspiração e a própria vazão, é uma abordagem que se destaca (WMO, 2008). A ausência de séries históricas de precipitação e vazão emerge como um ponto crítico a ser considerado, especialmente na avaliação de resultados simulados para pequenas bacias (BLÖSCHL, 2005). Assim, a busca por soluções que contornem essa carência de dados torna-se crucial para uma compreensão mais abrangente e precisa do comportamento hidrológico dessas áreas geográficas específicas.

### 3.3 Inundações em bacias hidrográficas urbanizadas de pequena escala

A complexidade das inundações em bacias hidrográficas urbanizadas de pequena escala apresenta desafios significativos, influenciando diretamente as comunidades locais e extrapolando fronteiras geográficas. O processo de urbanização emerge como um protagonista central, contribuindo de maneira substancial para o aumento das inundações em áreas urbanas (ZHANG et al., 2017; ZHOU et al., 2019; WU et al., 2020). À medida que as áreas urbanas se expandem, a impermeabilização do solo intensifica-se, reduzindo a capacidade de infiltração da água no solo e ampliando o escoamento superficial. Esse fenômeno é crucial para a ocorrência recorrente de inundações, especialmente em bacias de pequena escala (CHEN et al., 2017; WANG et al., 2019).

A intensidade e a duração da precipitação desempenham papéis cruciais na dinâmica das inundações em bacias urbanizadas de pequena escala (ZHANG et al., 2019; LASHERMES et al., 2018). Em regiões com solo impermeabilizado, a precipitação pode desencadear significativos aumentos no escoamento superficial, agravando o cenário de inundações (LIU et al., 2020). Além disso, a urbanização pode comprometer a capacidade natural de armazenamento de água da bacia hidrográfica, contribuindo para uma elevação do escoamento superficial e, conseqüentemente, para o aumento das inundações (WU et al., 2021). No Brasil, a Região Sudeste é uma das mais afetadas pelas inundações, principalmente nos Estados de Minas Gerais e São Paulo (SANTOS et al., 2019). Entre as causas que contribuem para a ocorrência desses eventos no país, estão a urbanização desordenada, a falta de planejamento urbano e a construção de moradias em áreas de risco (BHERING et al., 2018).

A previsão eficaz das inundações é um dos maiores desafios enfrentados pelos gestores de bacias hidrográficas urbanas, especialmente aquelas de pequena escala (ZOU et al., 2021). A necessidade de desenvolver sistemas de alerta precoce e estratégias de gestão de riscos adaptáveis torna-se ainda mais premente nesse contexto (CHEN et al., 2017; WU et al., 2020). Os modelos hidrológicos emergem como ferramentas essenciais para a previsão das inundações em bacias urbanas de pequena escala (LASHERMES et al., 2018; LIU et al., 2020; WU et al., 2021). Essas ferramentas podem avaliar o impacto de diferentes cenários de precipitação e a eficácia de diversas estratégias de gestão de riscos, contribuindo para uma gestão mais eficiente dessas bacias (WANG et al., 2019).

A urbanização intensifica a ocorrência de inundações em áreas urbanas, tornando crucial a implementação de abordagens integradas para gerenciar os riscos de enchentes em pequenas bacias urbanas (LIU et al., 2020; ZOU et al., 2021). Entre as medidas de adaptação, destaca-se

a implementação de infraestruturas verdes, como parques e jardins urbanos, e a construção de sistemas de drenagem que levem em consideração a capacidade de armazenamento natural das bacias hidrográficas de pequena escala (WANG et al., 2019; WU et al., 2021). Essas medidas visam não apenas mitigar os impactos das inundações, mas também promover uma gestão sustentável dessas bacias, considerando suas dimensões reduzidas.

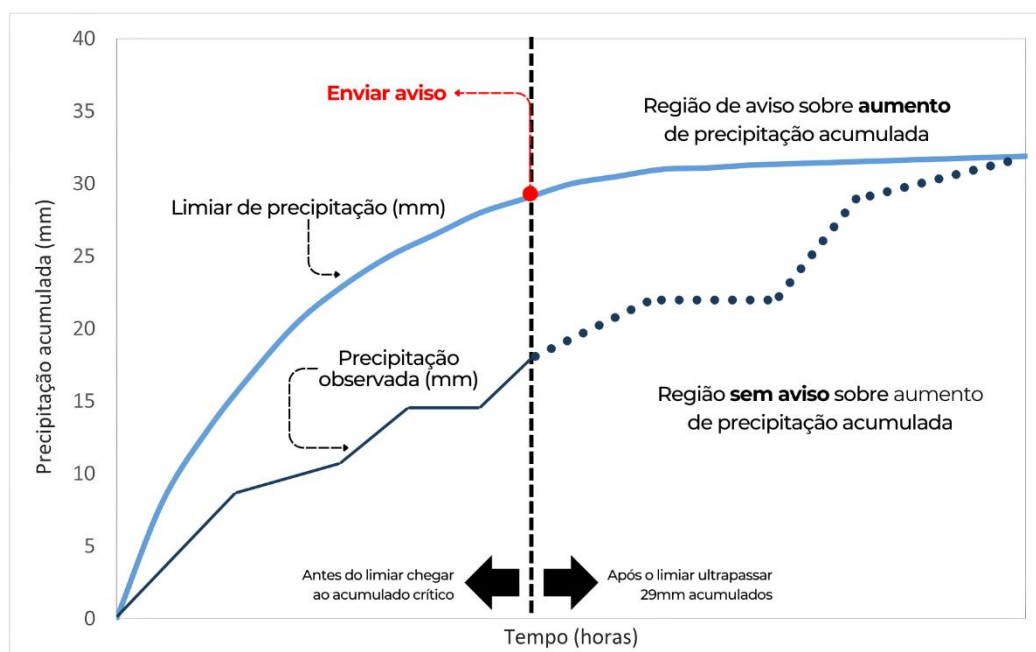
### **3.4 Limiares de chuva causadoras de inundação**

No contexto da prevenção e mitigação de inundações, a compreensão dos limiares de chuva desempenha um papel crucial. Esses limiares, que indicam as quantidades mínimas de precipitação associadas à probabilidade de ocorrência de inundação, são elementos fundamentais em sistemas de monitoramento e alerta (REICHENBACH et al. 1998, SEGONI et al. 2018). A capacidade de antecipar quais eventos de chuva têm potencial para desencadear inundações é vital para a implementação de estratégias eficazes de gerenciamento de riscos e resposta a emergências.

De modo geral, as determinações de limiares de chuva no contexto brasileiro são baseadas em acumulados de precipitação ao longo de 24, 48 ou 72 horas (SANTORO et al. 2010, MOLINA et al. 2015). Há, também, abordagens que envolvem a relação entre a intensidade da chuva, muitas vezes com dados limitados a 24 horas, e a precipitação antecedente (TATIZANA et al. 1987, MENDES et al. 2015). Com exceções mínimas, o Brasil começou a registrar sistematicamente a chuva em intervalos temporais apropriados para análises detalhadas somente após a implantação da rede de pluviômetros automáticos do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), iniciada em 2011.

Segundo Bacelar et al. (2020), o CEMADEN foi criado com o objetivo de monitorar e alertar sobre desastres naturais, incluindo chuvas intensas e riscos geológicos no Brasil. Equipado com uma rede estratégica de pluviômetros automáticos em todo o país, o centro coleta dados em tempo real. Essas informações são cruciais para entender os limiares de chuva que podem causar inundações, sendo enviadas à Defesa Civil de 957 municípios monitorados em todo o Brasil. Nesse contexto, a Figura 1 apresenta a utilização do limiar de precipitação como indicadores de alerta.

Figura 1 – Limiar de precipitação acumulada combinada com indicação de alerta.



Fonte: Autor.

De acordo com Alvalá e Barbieri (2017), diante do cenário operacional do CEMADEN, informações em tempo real são cruciais para monitorar condições geo-hidro-meteorológicas. Alertas de desastres naturais são imediatamente disparados se algum indicador ultrapassar limites críticos definidos para um município. Para avaliar danos humanos, são utilizados dados detalhados de setorização de áreas de risco fornecidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e Ministério de Minas e Energia, incluindo informações sobre moradias e população em risco.

O CEMADEN transforma esses dados em cartogramas e os integra à plataforma "Sistema Automático de Visualização de Riscos" (SALVAR), desenvolvida internamente com ferramentas de software livre. O SALVAR funciona como um centro de convergência, possibilitando a análise de dados variados de diferentes fontes. Essa abordagem ágil e integrada fortalece a eficácia do monitoramento, posicionando o CEMADEN como um pilar essencial na gestão abrangente de riscos e desastres naturais.

A automatização dos processos de coleta e análise de dados pelo CEMADEN não apenas acelera a resposta a eventos climáticos extremos, mas também permite uma compreensão mais abrangente das condições meteorológicas em diferentes regiões do Brasil. Além disso, a disseminação rápida de alertas baseados nessas informações contribui significativamente para a capacidade de resposta das comunidades locais e autoridades competentes. As informações coletadas pelo CEMADEN não são apenas utilizadas para

monitorar a intensidade e a distribuição da chuva, mas também alimentam modelos preditivos que auxiliam na identificação de áreas de risco e na previsão de possíveis eventos de inundação.

Conforme indicado pela Fundação GEO-RIO (2012), a revisão ou redefinição dos limiares pluviométricos críticos pode ser conduzida mediante uma análise abrangente de, no mínimo, cinco anos de dados referentes a precipitação na região de interesse. Este processo se fundamenta na investigação aprofundada dessas informações ao longo do período estipulado, visando aprimorar a compreensão dos padrões climáticos e dos eventos de deslizamentos.

Goudard (2019) destaca ainda que a variedade de limiares de chuva, tempo e definições utilizados em pesquisas de diferentes regiões do Brasil, conforme demonstrado na Tabela 1, evidencia a diversidade de abordagens metodológicas. Essa multiplicidade reflete a complexidade inerente às condições climáticas, ressaltando a importância de estratégias flexíveis e adaptáveis para compreender e enfrentar a variabilidade climática. No contexto brasileiro, Goudard (2019) observa que eventos climáticos extremos podem ser caracterizados pelos totais anuais, sazonais ou diários que apresentam desvios significativos em relação às médias convencionais da área, indicando um potencial desencadeamento de desastres.

Tabela 1 – Limiares de chuva e duração para eventos extremos adotados na literatura para diferentes regiões do Brasil.

<b>Autor</b>	<b>Região</b>	<b>Limiar</b>
Vicente (2004)	Região Metropolitana de Campinas	50mm/24h
Armond (2014)	Rio de Janeiro	20 mm /24h
Campos (et al. 2014)	Belém-PA	20 mm/24h
Monteiro (2016)	Ceará	50 mm/24h
Souza (et al. 2018)	Alfenas – MG	40 mm/24h
Silva (2018)	João Pessoa - PB	100 mm/24h
Goudard (2019)	Bacia do Alto Iguaçu - PR	30 mm/24h

Fonte: Adaptado de Goudard (2019).

Na literatura internacional, conforme destacado no estudo conduzido por Gambini et al. (2024) para avaliar limiares de precipitação visando sistemas de alerta de inundação na área urbana de Milão, e no trabalho de Abraham et al. (2020), que analisou os limiares para a ocorrência de deslizamentos de terra em quatro bacias urbanas na Índia, ambos os autores propuseram um limiar de chuva de 1 mm/h para essas regiões. LIU (2013) identificou um limiar de 25-50 mm/dia para chuvas consideradas fortes, enquanto 50 mm/dia foi definido como o limite de precipitação para chuvas extremamente intensas e superiores, aplicando o método do

valor crítico absoluto em bacias urbanizadas em uma determinada região Sudoeste da China. Croitoru et al. (2016), ao investigar mudanças nos extremos de precipitação na Romênia, indicaram um limiar de 30 mm/dia para precipitação extremamente intensa. Além disso, Fowler et al. (2021), ao estudar os limiares de precipitação causadores de inundação em algumas bacias do Centro-Oeste dos EUA, estabeleceram um limiar de 40 mm/dia. Esses estudos contribuem significativamente para a compreensão e definição de limiares de precipitação em diferentes contextos geográficos e hidrológicos.

Apesar dessas dificuldades, Oliveira (2012) superou obstáculos ao identificar limiares de chuva desencadeadores de inundação, utilizando dados de chuvas diárias. Seu estudo, embasado em uma série temporal de 30 anos, empregou estatísticas e cálculos de tempo de retorno (TR) na bacia hidrográfica do rio dos Sinos/RS, revelando eventos extremos de chuva com potencial para desastres.

Na Tabela 1, destacamos o trabalho de Souza et al. (2018), que identificou limiares de chuva desencadeadores de inundação para Alfenas - MG, próxima a Itajubá/MG. Utilizando dados de índices climáticos derivados de modelagem estatística computacional, por meio das ferramentas script RClindex e o software R, o estudo demonstrou que as chuvas em Alfenas/MG oscilam entre 1000 e 1500 mm anualmente. Os limiares, aproximadamente 40 mm, indicam que valores inferiores a 60 mm diários propiciam episódios efêmeros com chuvas intensas. Essas análises contribuem para uma compreensão mais profunda do comportamento climático e das possíveis tendências na região.

Limiares críticos de precipitação são determinantes para alertas em eventos de pluviosidade intensa (HOEDJES et al., 2014). O Plano de Prevenção a Desastres (PPDC) de São Paulo utiliza limites estabelecidos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) com base em dados pluviométricos, alertando sobre movimentos de massa. No Rio de Janeiro, o Departamento de Recursos Minerais (DRM-RJ) atualiza continuamente suas relações empíricas após eventos recentes. Em análises prévias de movimentos de massa, órgãos de monitoramento visualizam totais pluviométricos, comparando-os com limiares pré-definidos.

Além disso, nações enfrentando extremos hídricos adotam mecanismos operacionais com base em limiares de desencadeamento. O Flash Flood Guidance System (SWEENEY, 1992; UCAR, 2010) foi projetado e desenvolvido para ser utilizado interativamente por meteorologistas e especialistas em hidrologia em diversas partes do mundo, operacional desde 1992, oferece diagnóstico e prognóstico de inundações repentinas. Apesar de serem as mais letais, poucos países implementaram diretrizes específicas para gerenciamento de inundações repentinas, devido à dificuldade em prever e antecipar adequadamente. Inundações repentinas,

caracterizadas pela U.S. National Weather Service como intensificações rápidas, demandam condições atmosféricas específicas. A complexidade na calibração de modelos chuva-vazão indica a necessidade de abordagens mais simplificadas, como a de chuva-ocorrência.

Em regiões desprovidas de uma rede pluviométrica consolidada, recentes algoritmos de modelagens computacionais têm introduzido novas abordagens para caracterizar situações críticas de chuva. Essas metodologias, derivadas de estimativas de precipitação obtidas por meio de sensores remotos e redes avançadas de comunicação, são referências essenciais para a previsão de inundações repentinas (VILA et al., 2009). O desafio ultrapassa a busca por um campo de chuva mais realista, ele também abrange a utilidade e viabilidade dessa informação para ferramentas subsequentes que identificam processos de superfície suscetíveis.

A definição do limiar, representando a quantidade mínima de chuva necessária para desencadear uma inundação em determinado período, é vital para a tomada de decisões informadas. Limiares bem-calibrados e contextualmente relevantes permitem uma identificação mais precisa de situações de risco iminente, proporcionando tempo hábil para a implementação de medidas preventivas e a emissão de alertas à população.

Além disso, um limiar bem definido contribui significativamente para a confiabilidade dos modelos hidrológicos, sendo essencial para a interpretação precisa dos dados e resultados obtidos. A escolha cuidadosa desse ponto crítico considera a variabilidade das características locais, garantindo uma representação mais fiel das condições específicas de cada bacia hidrográfica.

### **3.5 Parâmetros Hidrológicos**

#### **3.5.1 Vazão de Projeto**

A vazão de projeto ou a expressão de flúvio superficial direto, refere-se à quantidade de água que se escoar da superfície de uma área específica em decorrência da precipitação que incide sobre ela (FERNANDES, 2002). A compreensão e análise da vazão de projeto são cruciais no processo de dimensionamento de estruturas hidráulicas em projetos de engenharia, assim como na definição das cotas de alerta para inundações.

De acordo com STEFFEN e RONDON (2000) para determinar essa vazão, é importante utilizar metodologias de cálculo que sejam não apenas confiáveis, mas também seguras. Dada a escassez de dados e a complexidade dos diversos fatores envolvidos, a opção recai sobre o emprego de métodos indiretos. Esses métodos, caracterizados por sua formulação simplificada, podem, no entanto, revelar-se inadequados para as condições específicas do local em questão.



Portanto, a seleção cuidadosa e a adaptação dessas abordagens tornam-se essenciais para garantir uma avaliação precisa das necessidades hidráulicas em determinado contexto.

Nesse sentido, nos estudos hidrológicos conduzidos para o desenvolvimento de projetos de sistemas de drenagem urbana, a compreensão da distribuição da chuva desempenha um papel fundamental. Essa compreensão é frequentemente alcançada por meio da utilização de modelos matemáticos que expressam a relação entre a chuva e a vazão, bem como das relações de intensidade-duração-frequência (IDF). Essas relações são vitais para estabelecer os padrões de chuva que podem ocorrer em diferentes cenários de projeto (ABREU et al., 2017).

A distribuição temporal da chuva é valiosa para estimar como a precipitação se distribui ao longo do tempo. Essa informação é essencial para identificar os momentos de fluxo de água mais elevado, ou seja, os picos de vazão, e para prever eventos climáticos extremos. Esses aspectos são cruciais para o planejamento e dimensionamento adequado das estruturas de drenagem nas áreas urbanas (CHOW, 1988).

Na literatura, há uma variedade de métodos para estimar a vazão de projeto, isto é, a vazão máxima relacionada a uma probabilidade de ocorrência e período de retorno (PRUSKI et al., 2006). Dentre esses métodos, destacam-se o Método Racional (DNIT, 2005), Método Ven te Chow (WILKEN, 1978), Método do Hidrograma Unitário e Método McMath (BATISTA et al., 2002). Um dos métodos frequentemente empregados é o Método Racional, uma abordagem indireta que estabelece uma correlação entre a precipitação e o escoamento superficial. Entretanto, sua aplicabilidade é limitada a bacias de pequena escala, com área de até 2 km<sup>2</sup>, bacias que ultrapassam esse limite são consideradas como pertencentes à categoria de macrodrenagem (FONSECA, 2017). Devido à sua simplicidade, o método Racional torna-se prevalente em cálculos hidráulicos. No entanto, devido à propensão desse método para superestimar a vazão em áreas extensas, alguns pesquisadores optam por incorporar um coeficiente de redução no valor da vazão de pico (PATRÍCIO et al., 2021).

Além disso, uma abordagem metodológica amplamente empregada em estudos hidrológicos é a técnica dos blocos alternados para a distribuição temporal da chuva. Nesse método, o período total de chuva é segmentado em blocos de tempo alternados, com durações pré-determinadas. Dentro de cada bloco, a intensidade da chuva é considerada constante, simplificando assim a representação dos padrões de precipitação e tornando os cálculos hidrológicos mais acessíveis (VIESMANN, 2002).

No entanto, é crucial considerar algumas limitações associadas a essa abordagem. Por exemplo, no contexto da disposição dos blocos no hidrograma, é vital reconhecer que a organização desses blocos é flexível, podendo resultar em diversas configurações. Uma dessas

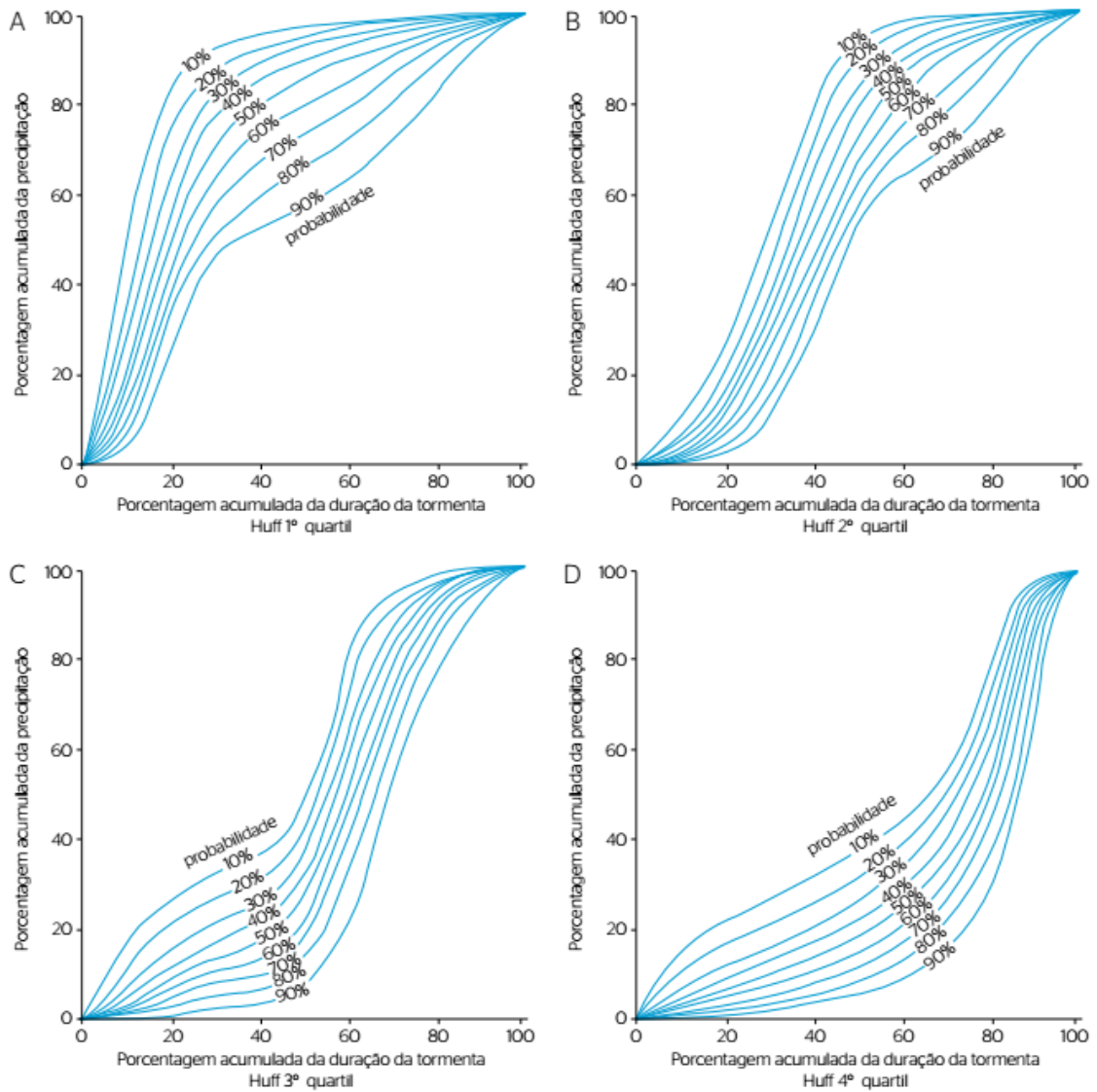
orientações é a obtenção de picos de maior magnitude, onde a parte mais intensa da precipitação é distribuída ao longo de um período equivalente a um terço a metade da duração total da chuva. Os blocos subsequentes são posicionados de maneira alternada. Importante salientar que, ao adotar um intervalo de tempo menor, é possível alcançar intensidades de pico mais elevadas, realçando assim a relação entre o tamanho do intervalo de tempo e as características do hidrograma (CANHOLI, 2005).

Além disso, é relevante destacar que a técnica de blocos alternados pode não capturar de forma adequada variações mais complexas nos padrões de chuva, especialmente em regiões com características climáticas distintas. Isso pode levar a estimativas menos precisas dos picos de vazão e do comportamento real do escoamento (ASCE, 1992). Além disso, ao simplificar os padrões de precipitação, é possível que os resultados gerados sejam menos representativos durante eventos de chuva intensa e de curta duração.

No entanto, existe outra abordagem amplamente utilizada para analisar a distribuição das chuvas. Um estudo conduzido por HUFF (1967) investigou 261 eventos de precipitação ocorridos ao longo de 11 anos, com durações variando de 30 minutos a 48 horas. Para essa pesquisa, 49 estações de medição foram implantadas em uma região rural abrangendo 1.000 km<sup>2</sup>. Durante a análise, as chuvas intensas foram divididas em quatro padrões temporais distintos. A seleção dos eventos de chuva para o estudo foi baseada em um critério específico. A chuva intensa foi considerada de forma isolada, onde não havia precipitação anterior por um período de pelo menos seis horas. Essa abordagem foi adotada porque o tempo médio total de chuva nas estações pluviométricas foi observado durante eventos nos quais a precipitação excedeu 13 mm. Além disso, as chuvas foram agrupadas em quartis, correspondendo aos intervalos de maior intensidade, permitindo uma análise estatística detalhada para cada quartil (HUFF, 1967; ABREU et al., 2017).

HUFF (1967) determinou que as chuvas mais intensas, geralmente ocorrendo em períodos menores que 12 horas, estariam entre o primeiro e o segundo quartil. Adicionalmente, o terceiro quartil foi definido para chuvas ocorrendo entre 12 e 24 horas, enquanto o quarto quartil abrangeu chuvas com duração superior a 24 horas (Figura 2). Esse método possibilitou uma compreensão mais precisa das características das chuvas em diferentes intervalos (HUFF, 1967).

Figura 2 - Curvas de probabilidade de excedência de chuva de HUFF.



Fonte: ABREU (2017).

Conforme indicado por Valentim et al. (2017), a investigação sobre os dados de vazões máximas tem como propósito e objetivo principal a estimativa das vazões de projeto, associadas a uma probabilidade específica de se igualar ou superar determinada vazão. Esta avaliação incorpora não apenas o tempo de recorrência, mas também a probabilidade de falha ao longo da vida útil, embasando-se em dados previamente registrados. Contudo, a disponibilidade de informações sobre vazões e cotas é restrita, muitas vezes exibindo lacunas substanciais nos registros diários e falhas representativas durante o período de observação.

Segundo as diretrizes da ELETROBRÁS (2000) para análise de chuvas máximas é recomendado criar uma série histórica de dados abrangendo as vazões médias mensais, sendo necessário um mínimo de 25 anos de registros ininterruptos. Conforme apontado por Cirino (2022), com o conhecimento desses dados históricos, se torna possível realizar previsões e

modelagens das precipitações máximas futuras, aplicando séries de chuvas máximas e utilizando distribuições de probabilidade, tais como a Normal, Distribuição Log-Normal, Gumbel e Log-Pearson tipo III.

Ainda conforme apontado por Valentim et al. (2017) e Costa e Fernandes (2015), as distribuições de probabilidade log-normal de dois e três parâmetros são as mais adequadas e que melhor representam a modelagem do comportamento hidrológico no Brasil.

A aplicação da distribuição Log-Normal de dois parâmetros (Fórmula 1) ocorre quando os valores logaritmos segue a distribuição normal (BACK, 2018; SILVINO et al., 2007). Além disso, CATALUNHA (2002) ao comparar com outros métodos para verificar o comportamento da precipitação, também testaram a distribuição de probabilidade. De acordo com CLARKE (1993), a distribuição de probabilidade Log-Normal é frequentemente utilizada em simulações e modelagem de eventos de cheias.

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[\ln(x)-\mu]^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

Onde:

$\mu$  = é a média dos logaritmos da variável x;

$\sigma$  = é o desvio padrão dos logaritmos da variável x.

Atualmente, uma das maiores problemáticas frente ao gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil é a escassez de informações provenientes de estações pluviométricas resulta na ausência de extensas séries temporais de dados de precipitação, essenciais para pesquisas no campo da hidrologia. Visando preencher essa lacuna, a CETESB (1986) realizou um estudo não apenas sobre a correlação entre as durações das chuvas intensas no Brasil, mas também elaborou os coeficientes de desagregação de chuvas, esses coeficientes derivam de cálculos baseados no estudo das chuvas intensas de PFAFSTETTER (1957), o qual englobou 98 estações pluviográficas distribuídas pelo País.

De acordo com BERTONI & TUCCI (1993) utiliza-se os coeficientes de desagregação de chuvas para transformar totais de chuva, com máxima duração de 24 horas, em valores correspondentes para durações mais curtas. Em locais onde há apenas dados diários medidos por pluviômetros convencionais, essa prática é comumente empregada para estabelecer relações de intensidade-duração-frequência (IDF). Na Tabela 2 é descrito os coeficientes de desagregação de chuva em tempos de até 5 minutos para qualquer TR.

Tabela 2 – Coeficientes de desagregação para diferentes tempos e durações de chuva.

<b>Relação entre alturas pluviométricas</b>	<b>Coefficiente de desagregação</b>
5 minutos / 30 minutos	0,34
10 minutos / 30 minutos	0,54
15 minutos / 30 minutos	0,70
20 minutos / 30 minutos	0,81
25 minutos / 30 minutos	0,91
30 minutos / 1 hora	0,74
1 hora / 24 horas	0,42
6 horas / 24 horas	0,72
8 horas / 24 horas	0,78
10 horas / 24 horas	0,82
12 horas / 24 horas	0,85
24 horas / 1 dia	1,14

Fonte: Adaptado CETESB (1986).

Considerando o coeficiente 24h/1dia, que representa a relação entre a chuva pluviográfica e a chuva pluviométrica (SILVEIRA, 2000), a decomposição da precipitação pluviométrica de 1 dia é realizada por meio de uma abordagem em cascata. De acordo a Tabela 1, para calcular o valor correspondente da precipitação em 5 minutos a partir de um dado de 24 horas, é necessário multiplicar o total inicial por 0,42 para obter o resultado para 1 hora. Em seguida, esse resultado deve ser multiplicado por 0,74 e 0,34 sequencialmente.

### 3.5.2 Tempo de Retorno

O tempo de retorno (TR) emerge como um elemento essencial na avaliação do risco associado às inundações e desastres relacionados. De acordo com TUCCI (2003) em um contexto onde a incerteza é inerente, compreender e quantificar o risco é crucial para tomar decisões fundamentadas em relação a eventos adversos, especialmente no cenário das inundações.

Denominado também como período de retorno ou recorrência, o TR é conceituado como o intervalo médio, em anos, no qual um evento hidrológico extremo pode ser igualado ou superado pelo menos uma vez. Sua determinação ocorre por meio da inversão da probabilidade, expressa pela Equação 2, onde P representa a probabilidade associada ao evento em questão (VILLELA e MATTOS, 1975). Essencialmente, o TR oferece uma perspectiva temporal que

permite entender a frequência com que eventos hidrológicos extremos podem ocorrer, contribuindo para uma abordagem mais precisa na gestão de riscos e na implementação de medidas preventivas.

$$TR = \frac{1}{P} \quad (2)$$

De acordo com Santos (2007) ao aplicar o conceito de TR, profissionais envolvidos na gestão de riscos relacionados a inundações podem identificar os períodos críticos e desenvolver estratégias de mitigação adaptadas a esses intervalos temporais específicos. Esta métrica possibilita calcular o período médio estimado entre as ocorrências de inundações, proporcionando uma base sólida para a previsão de impactos e a implementação de medidas preventivas.

Na Tabela 3, são listados os TR propostos pelo DAEE-CETESB (1980) associando o uso e cobertura solo em uma determinada área. Porto et al. (2000) ainda ressalta sobre as dificuldades em estabelecer o TR apropriado para cada situação, que frequentemente levam à preferência por valores recomendados na literatura.

Tabela 3 – Tempo de retorno para cada tipo de ocupação de área.

<b>Tipo de Obra</b>	<b>Tipo de ocupação da área</b>	<b>TR (anos)</b>
Microdrenagem	Residencial	2
	Comercial	5
	Edifícios de serviços ao público	5
	Aeroportos	2-5
	Áreas comerciais e artérias de tráfego	5-10
Macro-drenagem	Áreas comerciais e residenciais	50-100
	Áreas de importância específica	500

Fonte: DAEE-CETESB (1980)

### 3.5.3 Tempo de Concentração

No estudo hidrológico de uma bacia hidrográfica, o tempo de concentração ( $T_c$ ) é um parâmetro hidrológico utilizado para estimar o tempo que uma gota de água leva para percorrer toda a bacia hidrográfica, desde o ponto mais distante até o ponto de saída da mesma (MELLO et al., 2018). Esse tempo é fundamental para a modelagem hidrológica, uma vez que a sua superestimação ou subestimação pode levar a dados de vazão pouco confiáveis. Na Tabela 4 é descrito recomendações de  $T_c$  através do estudo realizado por Silveira (2005) com diferentes

tipos de bacias e declividades. Sendo S o parâmetro para declividade e L largura do trecho de rio.

Tabela 4 - Aplicabilidade fórmulas de Tc.

Nome	Local	Nº bacias	Área (km <sup>2</sup> )	S %	L (km)	Tipo
Izzard	EUA	-	-	<4	<0,02	Parcela
Kerby	EUA	-	<0,05	<1	<0,37	Parcela
O.Cin.	EUA	-	-	-	<0,03	Parcela
FAA	EUA	-	-	-	-	Parcela
Kirpich	EUA	6/7	<0,45	3/10	<1,2	Rural
SCS Lag	EUA	-	<8,1	-	-	Rural
Simas	EUA	168	<15	-	-	Rural
Chow	EUA	20	1,1/19	-	-	Rural
Dooge	Irlanda	10	140/19 30	-	-	Rural
Johnst.	EUA	19	65/42 00	-	-	Rural
C. Eng	EU	25	<12000	<14	<257	Rural
Giandotti	Itália	-	-	-	-	Rural
Pasini	Itália	-	-	-	-	Rural
Ventura	Itália	-	-	-	-	Rural
Picking	-	-	-	-	-	Rural
DNOS	EUA	6	<0,45	3/10	<1,2	Rural
G. Ribeiro	EUA/Índia	8	<19000	1/10	<250	Rural
Schaake	EUA	19	<0,7	<7	<1,8	Urbana
McCuen	EUA	48	0,4-16	<4	<10	Urbana
Carter	EUA	-	<21	<0,5	<12	Urbana
Eagleson	EUA	-	<21	-	-	Urbana
Desbordes	França	21	<51	<7	<18	Urbana
Espey	EUA	17	<91	-	-	Urbana

Fonte: Silveira (2005). (-) Informação não disponível nas fontes bibliográficas.

De acordo com a pesquisa conduzida por Silveira (2005), a aplicação da fórmula do Corps of Engineers revela-se apropriada para bacias rurais mais extensas, situadas na faixa de 12.000 km<sup>2</sup>, com um comprimento médio de 257 km e declividade de 14%. Entretanto, é destacado que essa abordagem, embora robusta para grandes bacias, pode superestimar os tempos de concentração quando aplicada a áreas de menor porte.

A metodologia de Ven te Chow, amplamente utilizada juntamente com a fórmula de Kirpich, foi originalmente desenvolvida para bacias rurais nos Estados Unidos, abrangendo áreas entre 1,1 e 19 km<sup>2</sup>. A fórmula de tempo de pico de Ven te Chow, inicialmente proposta

como fórmula de tempo de concentração, não incorpora um fator corretivo, o que pode resultar em uma subestimação do  $T_c$ . Portanto, Silveira (2005) indicou que para melhor aplicação foi aplicado um fator de correção de 1,67 para melhor adequação.

A metodologia da onda cinemática é apontada como adequada tanto para bacias rurais quanto urbanas, tendo como principal parâmetro o comprimento de 0,03 km. A fórmula de Kirpich, amplamente utilizada em várias regiões do Brasil, destaca-se por sua aplicabilidade em bacias rurais de menor porte, com área de 0,45 km<sup>2</sup>. Além disso, a metodologia de Pasini é mencionada como uma opção válida para o cálculo de tempo de concentração em bacias predominantemente rurais, tendo sido testada em bacias na Itália.

No contexto das bacias urbanas no Brasil, três opções se destacam: Carter, Schaake e Desbordes. As duas primeiras foram testadas em bacias dos EUA, enquanto a metodologia de Desbordes foi avaliada em bacias da França. Carter é indicada para bacias hidrográficas na escala de 21 km<sup>2</sup>, Schaake para áreas com aproximadamente 0,7 km<sup>2</sup> e declividade média de 7%, e Desbordes é recomendada para bacias urbanas de maior escala, em torno de 51 km<sup>2</sup>, também com uma declividade média de 7%.

### **3.6 Monitoramento de inundações**

A medição e previsão de chuvas são de extrema importância para a gestão dos recursos hídricos e a prevenção de desastres naturais. Existem diversas tecnologias disponíveis para a medição de chuvas, sendo os pluviômetros os instrumentos mais comuns e eficientes. Segundo Oliveira et al. (2016), os pluviômetros permitem a coleta de informações sobre a quantidade de precipitação em uma área específica durante um período determinado. Além disso, há tecnologias mais avançadas, como as estações meteorológicas automáticas, que possuem sensores para medir a precipitação, além de outras variáveis meteorológicas, como temperatura e umidade (Mudau et al., 2021). Outros instrumentos também são utilizados para a medição de chuvas, como os radares meteorológicos. Esses instrumentos são capazes de medir a precipitação em grandes áreas, possibilitando a visualização de fenômenos como frentes de chuva e tempestades, e fornecendo informações para a previsão do tempo em tempo real (Lima et al., 2019).

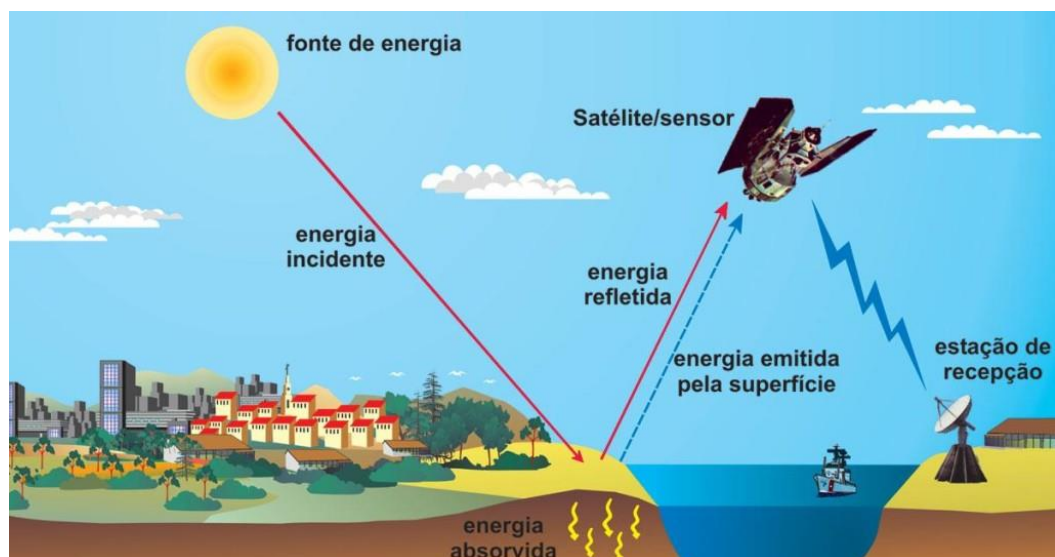
Existem outras formas de medição de chuva, como a utilização de sensores remotos, como o satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), que foi capaz de medir a precipitação em áreas extensas até o ano de 2015 (Adler et al., 2000). Atualmente, temos o GPM (*Global Precipitation Measurement*), que foi lançado como substituto do TRMM (Hou et al., 2014). Assim como o TRMM, o GPM utiliza radar e radiômetro de micro-ondas para



estimar a intensidade da chuva em diferentes regiões do planeta, permitindo uma melhor compreensão dos fenômenos meteorológicos, como as *flash floods* (Huffman et al., 2012). Além disso, o GPM também fornece dados em alta resolução temporal e espacial, permitindo a geração de mapas de chuva detalhados e aprimorando o monitoramento e previsão de eventos de inundação (Hou et al., 2014; Skofronick-Jackson et al., 2017). Com a evolução tecnológica, novos instrumentos e técnicas têm sido desenvolvidos para a medição e previsão de chuvas, tornando possível uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos e a prevenção de desastres naturais. A combinação de diferentes métodos e tecnologias pode fornecer informações mais precisas e abrangentes sobre a precipitação em uma região, possibilitando uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos e a prevenção de desastres naturais.

O uso combinado de sensoriamento remoto e geoprocessamento tem sido amplamente utilizado em estudos de inundações e modelagens hidrológicas. O sensoriamento remoto permite a coleta de informações sobre a cobertura vegetal, topografia e umidade do solo, fatores que afetam o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica (SOUSA et al., 2014; JOSHI et al., 2017; ALI et al., 2018). Já o geoprocessamento é usado para a integração de dados de sensoriamento remoto e dados coletados no campo, como dados hidrológicos, topográficos e meteorológicos (ZHANG et al., 2015; GAO et al., 2016). A coleta de dados por meio do sensoriamento remoto orbital pode ser visualizada na Figura 4.

Figura 4 - Coleta de dados por meio do sensoriamento remoto orbital.



Fonte: Florenzano (2017).

A integração dessas tecnologias permite a identificação de áreas de risco de inundação, a análise da dinâmica da água em bacias hidrográficas e a previsão de eventos hidrológicos extremos (FENG et al., 2014; FAKHREDDINE et al., 2016; LEE et al., 2018). Modelos

hidrológicos têm sido utilizados para simular eventos hidrológicos extremos e avaliar a resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica. Esses modelos combinam dados de sensoriamento remoto e dados coletados em campo para criar simulações precisas de eventos hidrológicos extremos (ZHOU et al., 2015; XIAO et al., 2017).

Diversos estudos têm sido realizados para entender e prever inundações e muitos deles utilizam a modelagem hidrológica como ferramenta para simular o comportamento do escoamento em bacias hidrográficas. Um estudo redigido por Norbiato et al. (2008) utilizou um modelo hidrológico que considera as condições de precipitação e umidade do solo para estimar o tempo de concentração da água na bacia hidrográfica. Esse modelo é usado para calcular o FFG (*Flash Flood Guidance*), que é o limite de precipitação que pode causar uma inundação na bacia. Os autores apresentam a metodologia aplicada em duas situações diferentes: Bacias calibradas e bacias não calibradas. Nas bacias calibradas, os parâmetros do modelo hidrológico são ajustados com base em dados históricos de chuva e vazão, para melhorar a precisão das estimativas do FFG. Nas bacias não calibradas, os parâmetros são transpostos de bacias calibradas semelhantes, para estimar o FFG com base em dados de precipitação e solo disponíveis. Os resultados do estudo mostram que a metodologia proposta pode ser eficaz para emissão de alertas de inundações repentinas, mesmo em bacias não calibradas.

Um estudo conduzido por Borga et al. (2011) envolveu a aplicação de um modelo hidrológico distribuído para prever a precipitação, calcular o limiar de condições de inundação (FFG) e estimar a vazão de pico em bacias hidrográficas selecionadas. Além disso, o estudo avaliou a capacidade de transposição de parâmetros do modelo para bacias não calibradas. A caracterização das inundações apresentadas no trabalho inclui a identificação de condições meteorológicas e hidrológicas que levam a esse tipo de inundação, bem como a descrição dos processos físicos que ocorrem durante o evento. Os autores também destacam a importância da topografia e da cobertura vegetal na modulação do escoamento superficial e, conseqüentemente, na ocorrência das inundações. A metodologia utilizada para prever as inundações repentinas envolveu a calibração do modelo hidrológico para várias bacias hidrográficas, a fim de estimar a relação entre a precipitação e a vazão. Com base nessa relação, foi possível calcular o limiar de condições de inundação (FFG), que é o valor mínimo de precipitação necessário para desencadear uma inundação em uma determinada bacia.

Além disso, o estudo avaliou a capacidade de transposição de parâmetros do modelo hidrológico para bacias não calibradas, a fim de permitir a aplicação do modelo em regiões onde não há dados de calibração disponíveis. Os resultados indicaram que a transposição de parâmetros do modelo é uma técnica promissora para estimar a vazão de pico em bacias não

calibradas. Para mitigar os impactos das inundações, é necessário adotar medidas de prevenção e gestão de riscos, como o monitoramento e previsão do tempo, o planejamento urbano adequado, a construção de infraestrutura de drenagem e a implementação de sistemas de alerta precoce (Bates et al., 2015; Renschler et al., 2016; Santos et al., 2019). Além disso, é importante promover a conscientização da população sobre os riscos e a importância de se evitar construções em áreas de risco (Bhering et al., 2018; Vitale et al., 2017).

A combinação dessas tecnologias tem fornecido informações importantes para a gestão de recursos hídricos e para a tomada de decisões em relação à gestão de riscos de inundação (PRASAD et al., 2014; JIANG et al., 2016). As tecnologias de sensoriamento remoto e geoprocessamento continuam a evoluir, oferecendo novas possibilidades para a análise e gestão de recursos hídricos.

### **3.6 Modelagem hidrológica**

A modelagem hidrológica assume uma relevância primordial na gestão e conservação dos recursos hídricos em uma determinada região. De acordo com Santos (2015), essa prática possibilita a antecipação do comportamento dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica, considerando as variáveis climáticas, o uso da terra e outras intervenções humanas.

Existem distintos tipos de modelos hidrológicos, sendo os mais usuais os modelos determinísticos e estocásticos. Conforme Sávio et al. (2018), os modelos determinísticos fundamentam-se em equações matemáticas que descrevem os processos hidrológicos, tais como precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial. Em contrapartida, os modelos estocásticos utilizam técnicas estatísticas para representar a incerteza vinculada aos dados e processos hidrológicos.

Além disso, existem modelos que correlacionam essas variáveis, sendo classificados como empíricos ou conceituais. De acordo com Rennó (2003) e Gotinjo (2007) os modelos empíricos, pautados principalmente em dados observacionais, buscam quantificar relações hidrológicas, no entanto, apresentam limitações, como a incapacidade de simular mudanças em condições não previstas, como eventos de chuvas extremamente elevadas. Em contrapartida, modelos conceituais, fundamentados em princípios físicos, procuram representar processos hidrológicos com base em leis fundamentais. Distinguem-se dos empíricos pela sua maior flexibilidade, permitindo simulações em diversas condições, tornando-os mais adaptáveis a mudanças e versáteis em termos de aplicabilidade.

Ainda de acordo com Rennó (2003) e Gotinjo (2007) na representação de dados hidrológicos, uma distinção crucial é feita entre modelos que lidam com informações discretas

e aqueles que tratam de dados contínuos. Modelos voltados para dados discretos abordam informações que são pontuais e específicas, geralmente representando eventos ou observações em momentos distintos. Essa abordagem é adequada para dados hidrológicos que são registrados em intervalos específicos de tempo ou locais específicos. Em contrapartida, os modelos que lidam com dados contínuos estão preparados para tratar de informações que variam de maneira contínua ao longo do tempo ou espaço. Essa flexibilidade permite uma representação mais precisa e detalhada dos fenômenos hidrológicos, sendo particularmente útil para análises que envolvem processos fluidos e contínuos. A escolha entre representação discreta ou contínua depende da natureza dos dados disponíveis e dos objetivos específicos da modelagem hidrológica em questão.

Os modelos hidrológicos, responsáveis por prever e compreender o comportamento das bacias hidrográficas, também podem ser classificados como modelos distribuídos, semi-distribuídos ou concentrados. Conforme Ribeiro et al. (2017), os modelos distribuídos segmentam a bacia hidrográfica em sub-bacias menores, incorporando a variabilidade espacial dos processos hidrológicos. Essa abordagem considera as características específicas de cada sub-região, tornando-se particularmente relevante para bacias de pequena escala.

Dentro dessa classificação, é relevante destacar os modelos semi-distribuídos como uma variante que integra elementos tanto dos modelos distribuídos quanto dos concentrados. Esses modelos reconhecem a importância da diversidade espacial na bacia hidrográfica, enquanto, ao mesmo tempo, adotam uma abordagem simplificada ao agregar características específicas para otimizar a modelagem. A utilização de modelos semi-distribuídos apresenta-se como uma alternativa equilibrada para abordar a complexidade hidrológica em bacias de pequena escala, proporcionando uma representação mais precisa dos processos envolvidos (Smith et al., 2016).

Em contrapartida, os modelos concentrados, conforme mencionado por Ribeiro et al. (2017), optam por utilizar apenas um ponto de medição para representar toda a bacia hidrográfica. Embora essa abordagem simplificada possa ser eficiente em determinadas situações, especialmente em bacias de maior extensão, pode não ser tão adequada para capturar a variabilidade espacial característica de bacias de pequena escala. Assim, a escolha entre modelos distribuídos, concentrados ou semi-distribuídos depende da escala e das características específicas da bacia hidrográfica em questão, buscando sempre a melhor adequação para a representação precisa dos processos hidrológicos.

A seleção do modelo hidrológico apropriado está ligada às características da bacia hidrográfica e aos objetivos do estudo. Por exemplo, para prever a vazão em um ponto específico da bacia, um modelo concentrado pode ser suficiente. No entanto, para compreender

o impacto do uso da terra em diferentes partes da bacia, um modelo distribuído pode ser mais adequado, como destacado por Gomes et al. (2017). A utilização de softwares para modelagem hidrológica tem se tornado cada vez mais comum. Segundo Carvalho et al. (2016), essas ferramentas possibilitam a criação eficiente e precisa de modelos hidrológicos complexos. Além disso, os softwares facilitam a visualização e análise dos resultados dos modelos, tornando a interpretação mais acessível e contribuindo para a tomada de decisões. Na Tabela 5, apresentam-se alguns modelos frequentemente empregados, categorizados conforme sua classificação, abrangendo aspectos determinísticos, estocásticos, empíricos, conceituais, distribuídos, semi-distribuídos ou concentrados.

Tabela 5 – Modelos mais utilizados de acordo com sua classificação.

<b>Nome do modelo</b>	<b>Referência</b>	<b>Considerações</b>
Stanford Watershed Model (SWM)	Crawford e Linsley (1966)	Contínuo, simulador hidráulico e hidrológico dinâmico ou de estado permanente e processos de qualidade da água.
Hydrology Engineering Center-Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)	Feldman (1981) HEC (1981, 2000)	Conceitual, semi-distribuído, por evento.
Soil Water Assessment Tool (SWAT)	Arnold et al. (1998)	Contínuo, conceitual e distribuído.
Physically-Based Streamflow Production Model (Top Model)	Beven e Kirkby (1976, 1979) Beven (1995)	Modelo de simulação hidrológica contínuo.
Streamflow Synthesis e Reservoir regulation Model (SSARR)	U.S. Army Corps of Engineers (1987)	Modelo de Simulação de vazões contínuo e concentrado.
National Weather Service-River Forecast System (NWS-RFS)	Burnash et al. (1973) Burnash (1975)	Concentrado, sistema de previsão contínua.
Tank	Sugawara et al. (1974), Sugawara (1995)	Modelo de simulação contínuo, semi-distribuído ou concentrado.
Xinanjiang	Zhao et al. (1980) Zhao e Liu (1995)	Modelo de simulação concentrado contínuo.
Système Hydrologique Européen/Système Hydrologique Européen Sediment (SHE/SHESED)	Abbot et al. (1896), Bathurst et al. (1987)	Escoamentos superficial e sedimentos, fisicamente fundamentado, distribuído e contínuo.

Fonte: Adaptado LEITE (2015), GOTIJO (2007), TUCCI (1997).

Conforme apontado por Salvadore et al. (2015), os modelos hidrológicos são frequentemente categorizados levando em consideração tanto sua resolução espacial quanto temporal. As abordagens de modelagem escolhidas abrangem a urbanização, abordando tanto a escala da bacia hidrográfica quanto a escala de cidade. O autor definiu que os modelos aplicados à escala da bacia hidrográfica englobam áreas iguais ou superiores a 10 km<sup>2</sup>, enquanto os conceituados como escala de cidades são destinados a áreas menores. Adicionalmente, o autor delineou os modelos amplamente utilizados globalmente, fornecendo detalhes abrangentes sobre resolução espaço-temporal, área de estudo e referências pertinentes a esses estudos. Diante das características da área de drenagem semelhante à Bacia Hidrográfica do Ribeirão José Pereira (BHRJP), a Tabela 6 revela os modelos mais utilizados na literatura.

Tabela 6 – Modelos hidrológicos utilizado na literatura de acordo com área de drenagem semelhante à BHRJP.

<b>Modelo</b>	<b>Referência</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Escala espacial</b>	<b>Escala Temporal</b>
SWMM, and SWMM + inundation model	Petrucci e Bonhomme (2014) e Krebs et al. (2014)	2.3, 10.5, 250	Semi-distribuído	10 min, 15min e 1 hora
MUSIC	Dotto et al. (2011) e Hamel e Fletcher, 2013	0.105, 0.28, 0.38, 0.89, 1.06, 40	Semi-distribuído	6 minutos e 1 hora
Distributed Urban Drainage model	Pan et al. (2012)	2, 100	10 m, 200 m	1s-1min
ReFH	Faulkner e Barber (2009) e Kjeldsen et al. (2005)	15–997	Agrupado	1h-1d
DORS	Zhou et al. (2010)	25.15, 94.88	UHE (objeto), 10–30 m	1 h
WetSpa	Chorman'ski et al. (2008), Berezowski et al. (2012) e Verbeiren et al. (2013)	31, 105.9, 142	30m	1h,1d
CANOE	Lhomme et al. (2004)	52	Semi-distribuído	30s
MERCEDES	Lhomme et al. (2004)	52	25m	10min

Fonte: Adaptado Salvadore et al. (2015).

Ainda conforme Salvadore et al. (2015), as categorias referentes à escala espacial foram delineadas como agrupadas, semi-distribuídos por meio de sub-bacias, urbanas baseadas em elementos hidrológicos (UHE) e distribuições espaciais baseadas em grade, sendo estas últimas aplicáveis nos casos em que os dados são expressos em metros. Os modelos de escala agrupada são geralmente mais simplificados em comparação com outras abordagens, sendo particularmente valiosos em situações de dados limitados, proporcionando uma avaliação preliminar do sistema de água urbana na saída de captação, embora careçam de informações espaciais substanciais. Por outro lado, os modelos semi-distribuídos, que operam através de sub-bacias, consideram as sub-regiões da bacia hidrográfica como uniformes em termos de processos hidrológicos, requerendo dados espaciais em contraste com os modelos concentrados. Esses modelos têm potencial para fornecer uma quantidade mais significativa de dados, especialmente quando aplicados a sub-bacias de pequena escala derivadas da topografia. Especificamente, os modelos semi-distribuídos incorporam sub-bacias como uma função da topografia. No domínio dos modelos urbanos baseados em UHE, sua principal aplicação reside na análise dos fluxos de água urbana. Embora o conceito de UHE varie ligeiramente entre diferentes modelos, a ideia comum é identificar um objeto ou unidade de cálculo suficientemente pequeno para representar a heterogeneidade urbana e homogêneo em relação aos processos hidrológicos urbanos. Quanto à distribuição espacial baseada em grade, a utilização eficiente desses modelos distribuídos está associada à variabilidade espacial proporcionada por mapas GIS e sensoriamento remoto. Esses modelos realizam cálculos para cada célula da grade, sendo que o nível de complexidade varia conforme a resolução espacial dos dados de entrada e a descrição interna dos processos.

### 3.7.1 Modelo HEC-HMS

A modelagem chuva-vazão é uma ferramenta crucial para antecipar o comportamento de rios e bacias hidrográficas, podendo ser conduzida por meio de diversos modelos hidrológicos. Os modelos precipitação-vazão são amplamente adotados no estudo de bacias hidrográficas, centrando-se na previsão do escoamento dessas áreas, com a precipitação como variável de entrada.

Nesse sentido, o HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System*), um modelo hidrológico consagrado para a análise de bacias hidrográficas. Este modelo possibilita simular o comportamento de uma bacia em resposta à precipitação e outras variáveis hidrológicas. Oliveira e Martins (2019) destacam que o HEC HMS é amplamente utilizado

globalmente, reconhecido por sua eficiência, facilidade de aplicação e por possuir código aberto com sua utilização gratuita.

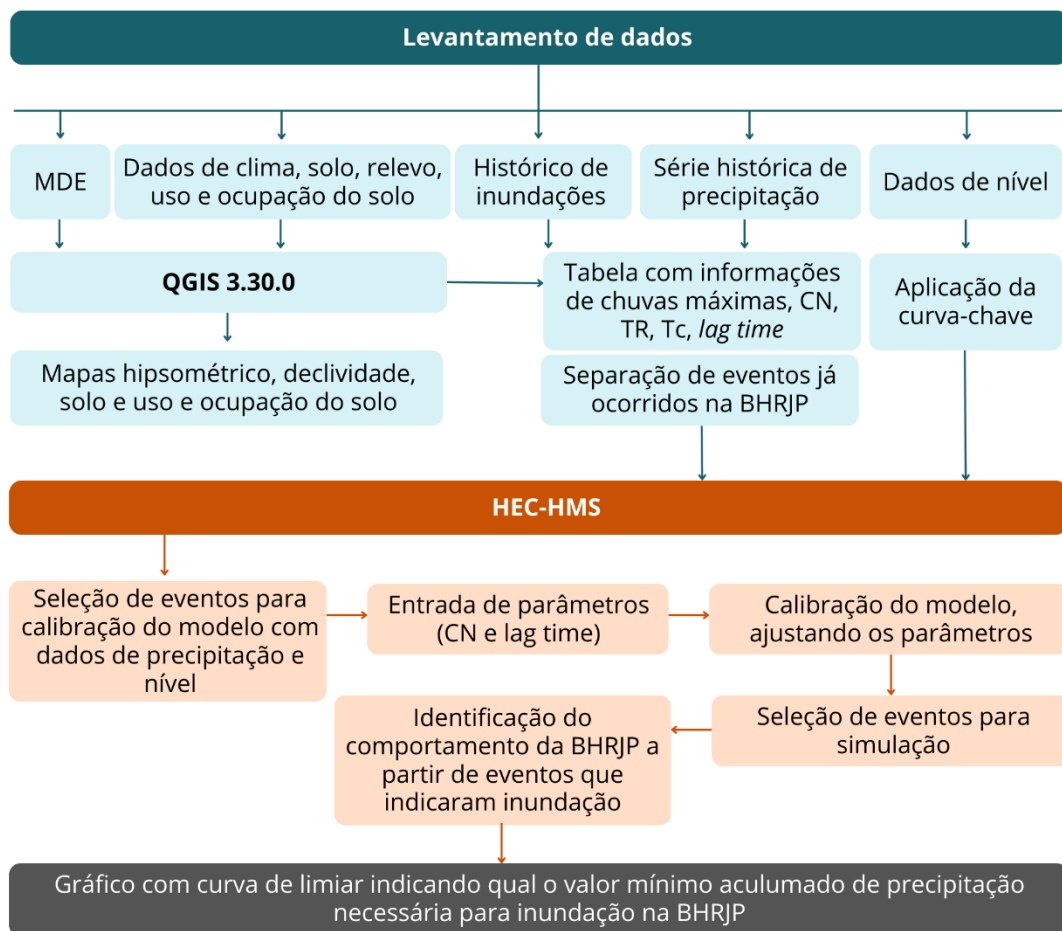
O HEC-HMS é uma ferramenta fundamental para estudos de engenharia hidráulica. Esse software permite análises abrangentes, incluindo precipitação-chuva-vazão, modelagem de escoamento superficial, estimativa de vazões máximas e mínimas, além de previsão de enchentes. Sua interface gráfica intuitiva simplifica a entrada de dados hidrológicos e a calibração dos modelos, enquanto oferece recursos robustos para visualização e análise dos resultados. A aplicação da modelagem chuva-vazão estende-se à previsão de eventos extremos, como enchentes e secas, auxiliando na identificação de áreas vulneráveis, o que possibilita a implementação de medidas preventivas para mitigar os impactos desses eventos (Santos et al., 2017).



## 4 METODOLOGIA

Neste tópico, é apresentada a metodologia utilizada para a simulação hidrológica, com o uso do software HEC-HMS e, posteriormente, a caracterização da precipitação na BHRJP. São descritas as etapas e estruturas para a fase de preparação dos dados de entrada que incluem o acesso, processamento de imagens, estudo dos dados hidroclimáticos, o processo de discretização das sub-bacias e fatores associados para escolha, o pré-processamento do modelo, a forma de realização da calibração na fase de modelagem, a análise dos indicadores de desempenho da calibração. Um resumo dos procedimentos é apresentado no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma conceitual do estudo na BHRJP.



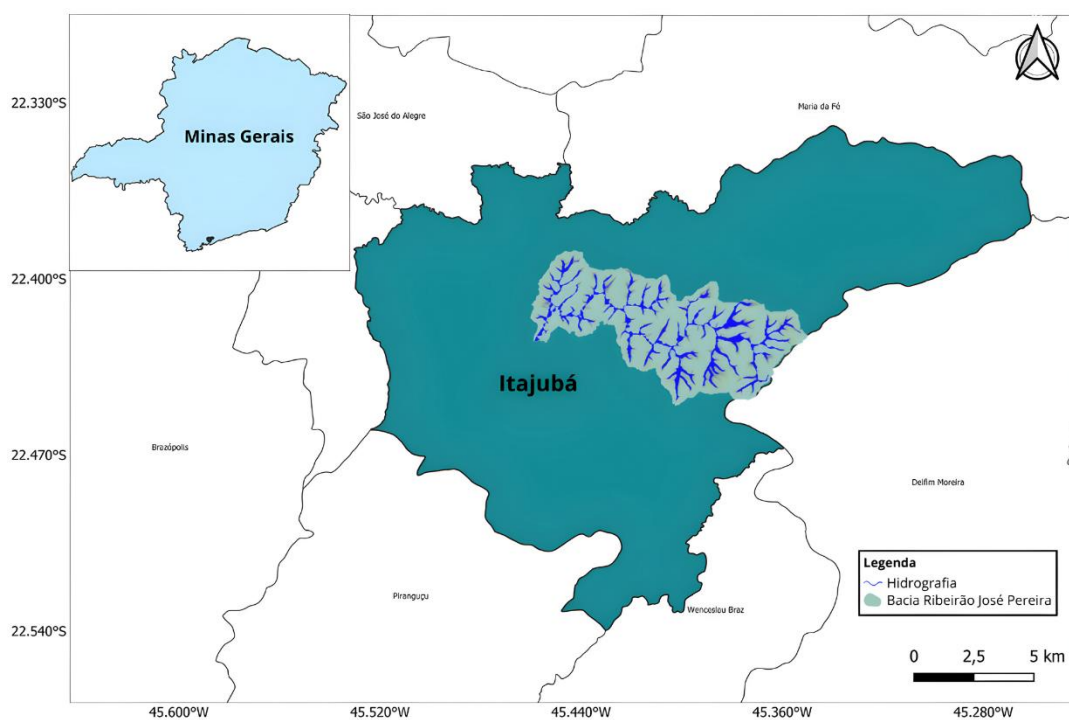
Fonte: Autor.

## 4.1 Bacia hidrográfica Ribeirão José Pereira

### 4.1.1 Caracterização da área de estudo

A BHRJP é um curso d'água localizado no município de Itajubá em Minas Gerais (Figura 6) entre as coordenadas 22°23'45.25" a 22°27'6.41" de latitude Sul e 45°27'2.84" a 45°20'57.33" de longitude Oeste. A bacia possui uma área de aproximadamente 39 km<sup>2</sup>, sendo 16 km o comprimento do talvegue principal que atravessa o município até sua foz no Rio Sapucaí, que por sua vez é um importante tributário do Rio Grande, passando por áreas urbanas e rurais.

Figura 6 - Mapa de localização da BHRJP.



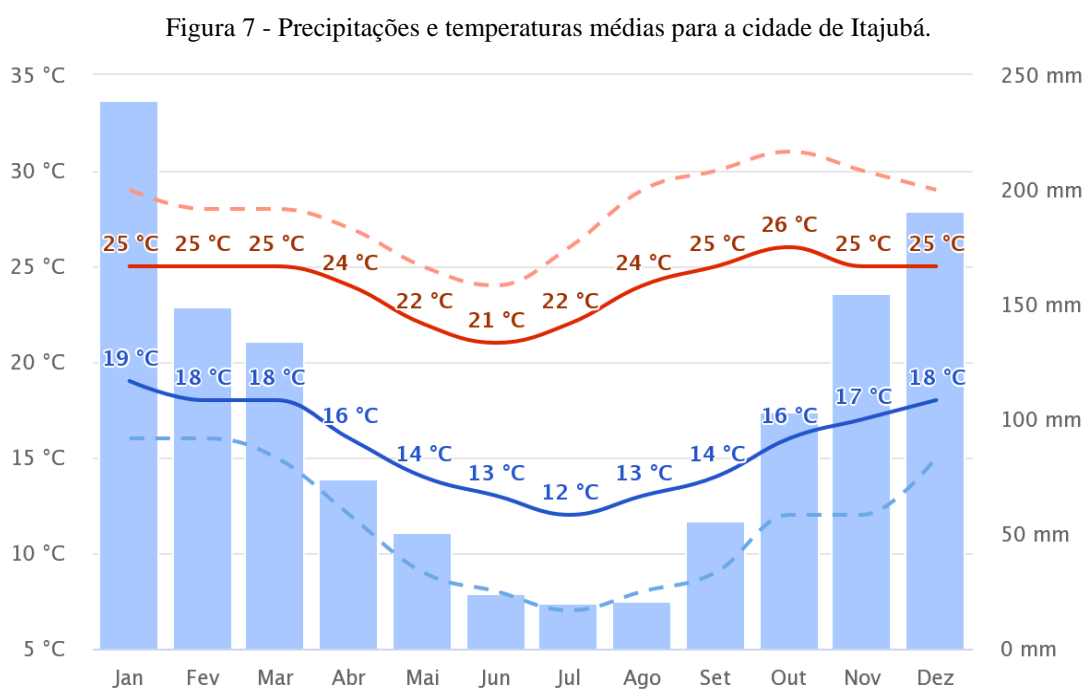
Fonte: Autor.

De acordo com Diniz e Silva (2015), ao longo da extensão do manancial, a área exibe uma parcela rural, dominada por vastas extensões de pastagens, e uma zona urbana. Esta por sua vez, tem registrado ocorrência de eventos de inundações, atribuídos à impermeabilização do solo decorrente da expansão urbana. Tal fenômeno evidencia-se como resultado direto da urbanização, impactando na capacidade de absorção e drenagem natural do local.

O clima é classificado como Cwb (mesotérmico úmido com inverno seco) de acordo com a classificação Köppen-Geiger (INMET, 2023). As temperaturas na região são amenas durante todo o ano, com média anual de 19,6°C e variação entre 12,7°C e 26,1°C (INMET,

2023). A umidade relativa do ar é elevada, com média anual em torno de 77%, o que contribui para a sensação de abafamento. A cidade apresenta uma estação chuvosa bem definida, concentrada entre os meses de outubro a março, enquanto a estação seca ocorre entre abril e setembro.

De acordo com a análise dos dados pluviométricos e de temperatura dos últimos 30 anos, apresentados na Figura 7, é possível observar que Itajubá tem uma soma anual de precipitação de cerca de 1300 mm, sendo que os meses mais chuvosos foram dezembro e janeiro, com médias de 180mm e 240mm, respectivamente. Já o período de abril a setembro apresentou baixa precipitação, com médias mensais abaixo de 50 mm. Vale ressaltar que a variabilidade pluviométrica é uma característica marcante na região, podendo ocorrer anos com precipitações acima ou abaixo da média (INMET, 2023).



Fonte: INMET (2023).

Segundo a análise do INMET, o clima em Itajubá tem sido influenciado pelo aumento das temperaturas médias anuais nas últimas décadas. Essa tendência é observada em todo o país, sendo uma das consequências das mudanças climáticas causadas pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa. Esse cenário pode trazer impactos para a produção agrícola, recursos hídricos e saúde humana na região (SILVA et al., 2018).

#### 4.1.2 Histórico de inundações

A BHRJP é uma área de grande importância para o município e sua população, sendo responsável por fornecer água para o abastecimento urbano e rural e por auxiliar no desenvolvimento econômico da região. No entanto, a bacia também é conhecida por ser suscetível a enchentes, especialmente durante os períodos de chuvas intensas, de acordo com o Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí (2016).

De acordo com um estudo realizado por Souza et al. (2016), o Ribeirão José Pereira apresenta uma vazão média anual de 5,8 m<sup>3</sup>/s, com variações significativas ao longo do ano devido ao regime pluviométrico da região. A pesquisa realizada por Miranda et al. (2018) que analisou dados de vazão do Ribeirão José Pereira em diferentes pontos, teve como objetivo avaliar a influência das chuvas na dinâmica do curso d'água. Os resultados indicaram que a bacia hidrográfica apresenta uma resposta rápida às precipitações, com aumento significativo da vazão em curtos períodos de tempo trazendo problemáticas ao planejamento e gestão adequados dos recursos hídricos na região.

De acordo com dados publicados pelo CEMADEN e boletins meteorológicos emitidos pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), a partir do ano de 2010, observou-se um aumento na recorrência de inundações no Ribeirão José Pereira, o que tem chamado a atenção das autoridades e especialistas para a necessidade de ações efetivas de prevenção e gestão de riscos. O evento de chuva ocorrido em 2011 foi um dos mais impactantes, quando o ribeirão transbordou cerca de 1,20 metros acima das ruas, causando danos em alguns pontos comerciais. Nesse evento, foram registrados 83,8 mm de chuva em apenas um dia, mais da metade da precipitação acumulada durante todo o mês de setembro.

Em 2017, uma chuva intensa de aproximadamente 54 mm, que durou pouco mais de 30 minutos, novamente provocou o transbordamento do ribeirão, deixando ruas cobertas pela água e causando alagamentos em imóveis. Comerciantes também sofreram prejuízos na área central da cidade.

No ano seguinte, em 2018, uma tempestade com granizo e rajadas de vento, acompanhada por uma chuva de aproximadamente 60,2 mm em apenas 25 minutos, resultou em grandes estragos na região. Em 2019, ocorreu mais um fenômeno de chuva intensa, com duração de aproximadamente 30 minutos e totalizando cerca de 40 mm, causando alagamentos em diversos bairros. Em 2021, a cidade foi novamente afetada por uma chuva de 83,8 mm em apenas algumas horas, superando mais uma vez a quantidade de chuva esperada para o mês

todo. Esses eventos de precipitação intensa têm sobrecarregado o sistema de drenagem local e contribuído para o transbordamento do Ribeirão José Pereira.

A inundação mais recente ocorreu em 2023 (Figura 8), quando fortes chuvas levaram ao transbordamento do ribeirão e causaram inundações em vários bairros da cidade. A Defesa Civil registrou 60 mm de chuva em aproximadamente 30 minutos durante esse evento. Os danos resultantes foram significativos, com várias residências afetadas e interrupção dos serviços de água e energia elétrica em algumas áreas, de acordo com a Prefeitura Municipal de Itajubá (2023).

Figura 8 - Inundações ocorridas na área urbanizada da BHRJP em fevereiro de 2023.



Fonte: G1 Globo (2023).

É importante ressaltar que esses eventos de inundações na Bacia Hidrográfica do Ribeirão José Pereira não são isolados, pois a cidade de Itajubá também enfrenta desafios similares com os transbordamentos do Ribeirão Anhumas e do Rio Sapucaí. Esses episódios de alagamentos e inundações apontam para a necessidade de uma abordagem abrangente e integrada na gestão dos recursos hídricos e no planejamento urbano, visando a redução dos impactos.

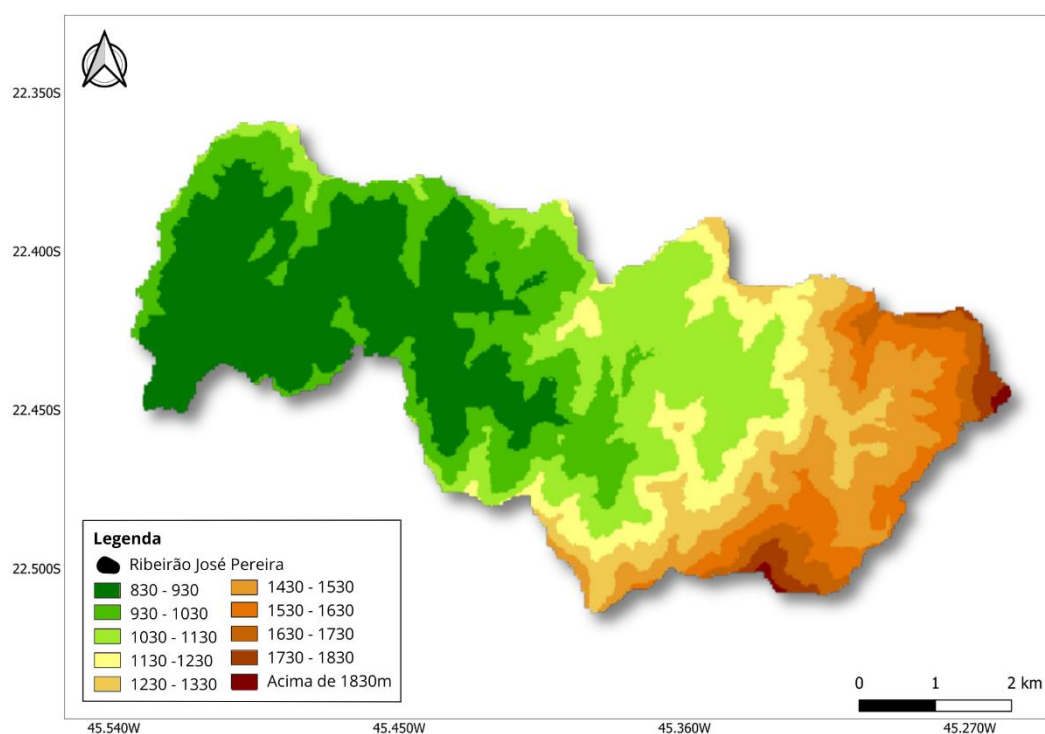
#### 4.1.3 Hipsometria e declividade

A BHRJP apresenta uma amplitude de altitude significativa, com elevações variando de cerca de 800 metros a mais de 1800 metros acima do nível do mar (FERREIRA, 2018). De acordo com Santos e Lima (2016), a porção oeste da bacia apresenta as menores altitudes, onde ocorrem as planícies fluviais e o núcleo urbano da cidade de Itajubá. Nessa região, a altitude média é de aproximadamente 850 metros.

Já as maiores elevações são observadas a leste da bacia, onde estão presentes a Serra do Juru e a Serra dos Toledos. Segundo Silva et al. (2020), a Serra do Juru apresenta altitudes que variam de 1200 a 1900 metros, enquanto que a Serra dos Toledos apresenta elevações de

aproximadamente 1500 metros (Figura 9). Essas serras são importantes divisores de água na região e contribuem para a formação de importantes nascentes de rios e córregos na BHRJP. Os respectivos dados da Figura 9 foram extraídos do banco de dados geomorfométricos TOPODATA.

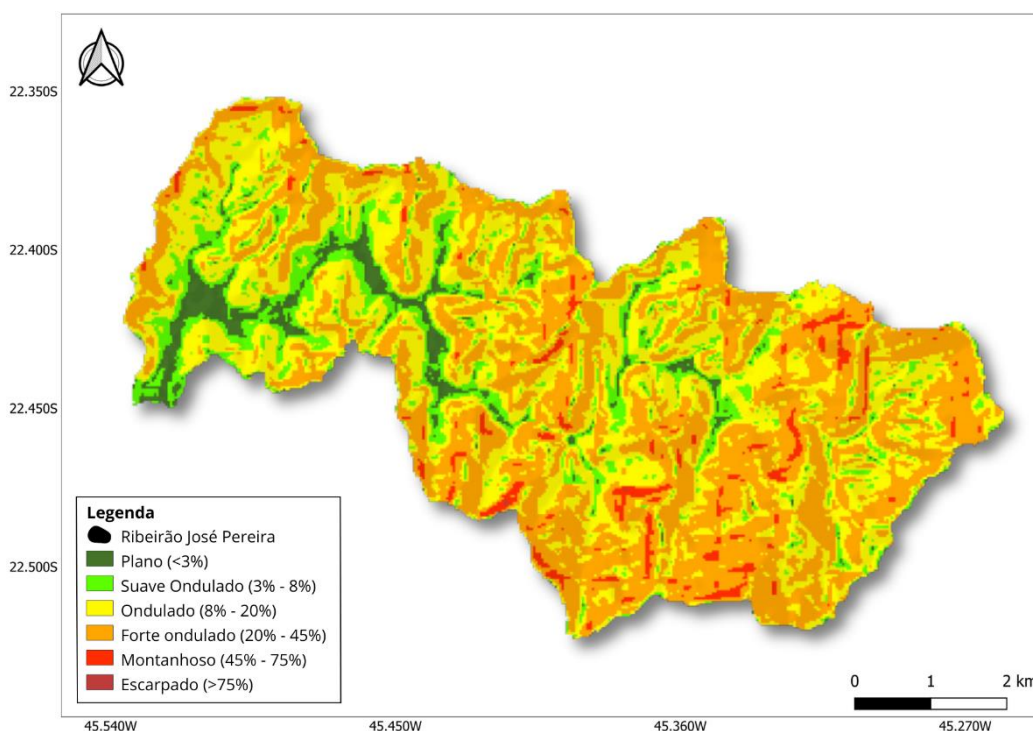
Figura 9 - Mapa hipsométrico da BHRJP.



Fonte: Autor.

A bacia apresenta uma declividade complexa ao longo de seu curso, caracterizada por trechos íngremes e trechos mais suaves (Figura 10). Segundo um estudo realizado por Silva et al. (2021), a declividade média da bacia é de 19,3%, com variações que vão desde 0,1% em áreas de várzea até 77,9% em áreas de encosta.

Figura 10 – Mapa de declividade da BHRJP.



Fonte: Autor.

Além disso, o estudo revelou que a declividade é um fator importante na distribuição espacial dos usos do solo na bacia, influenciando diretamente na ocupação e no manejo da terra. As áreas de encosta, por exemplo, apresentam uma maior concentração de áreas degradadas e fragmentos florestais, enquanto as áreas de várzea são ocupadas, principalmente, por pastagens e culturas agrícolas (Silva et al., 2021).

#### 4.1.4 Solos

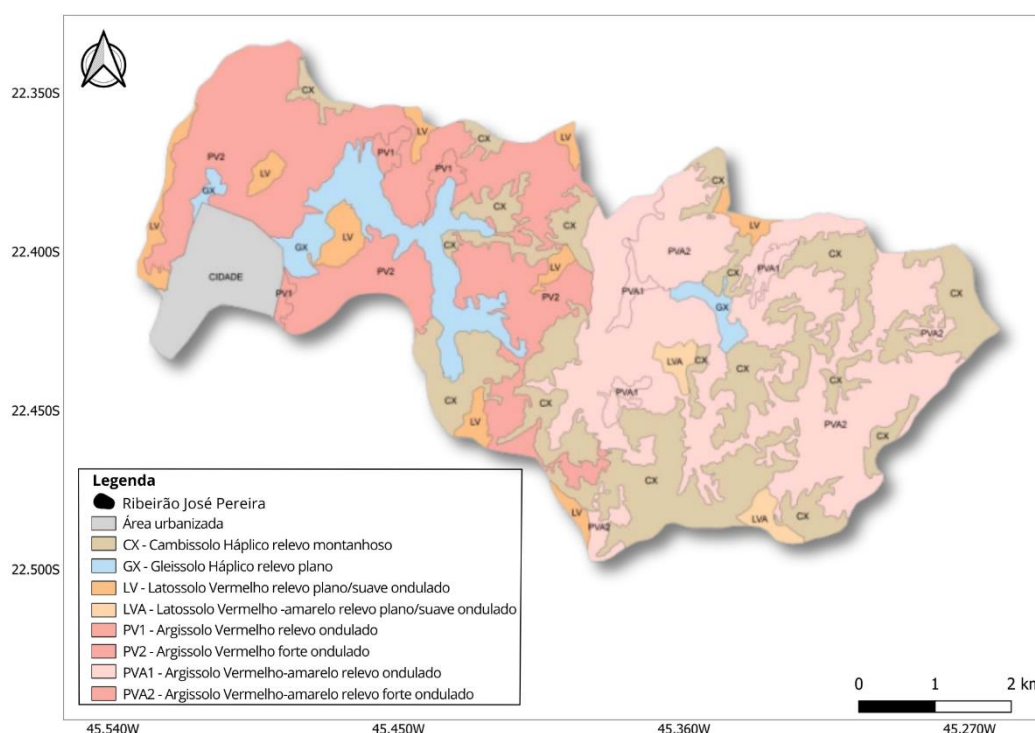
A BHRJP apresenta uma diversidade de solos, que variam em função da geologia e topografia da região. De acordo com os dados do Plano Municipal de Saneamento Básico de Itajubá (2018), grande parte dos solos presentes na bacia são classificados como Argissolos e Latossolos. Dentre esses solos, os argissolos se caracterizam por uma camada superficial rica em argila, proporcionando excelente capacidade de retenção de água e nutrientes, além de alta fertilidade. Por outro lado, os latossolos apresentam maior profundidade, baixa capacidade de retenção de água e nutrientes e menor fertilidade, embora ainda sejam adequados para o cultivo de diversas culturas (SILVA et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2019; PASSOS, 2017).

O estudo realizado na bacia hidrográfica BHRJP por Lima (2012) reclassificou e mapeou os solos da região (Figura 11) na escala 1:25.000, onde foram identificadas oito



unidades de mapeamento de solos, incluindo Cambissolo Háplico em relevo montanhoso (CX), Gleissolo Háplico em relevo plano (GX), Latossolo Vermelho em relevo plano ou suave ondulado (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo em relevo plano ou suave ondulado (LVA), Argissolo Vermelho-Amarelo em relevo ondulado (PVA1), Argissolo Vermelho em relevo ondulado (PV1), Argissolo Vermelho em relevo forte ondulado (PV2) e Argissolo Vermelho-Amarelo em relevo forte ondulado (PVA2), podendo ser visualizado na Figura 11.

Figura 11 - Mapa de Solos da BHRJP.



Fonte: Adaptado Lima (2012).

Os Cambissolos são solos rasos e pouco desenvolvidos, com baixa fertilidade natural e susceptíveis à erosão, conforme estudo de Medeiros et al. (2018). Eles são encontrados em regiões montanhosas, encostas íngremes e em áreas de clima semiárido. Já os Gleissolos, de acordo com Mendes et al. (2019), são solos hidromórficos, com alta fertilidade natural, utilizados em diversas atividades agrícolas, mas também susceptíveis a problemas como compactação e salinização. Ambos os solos apresentam vantagens e limitações em relação à sua utilização na agricultura e requerem cuidados específicos para garantir sua produtividade e preservação.

Ainda, segundo Lima (2012), os Cambissolos Háplicos são predominantes na região montanhosa, ocupando 26% da área total. Já os Gleissolos ocupam 7% da sub-bacia, localizada nas baixadas, onde se formam zonas de acúmulo de água, o que confere aos solos características

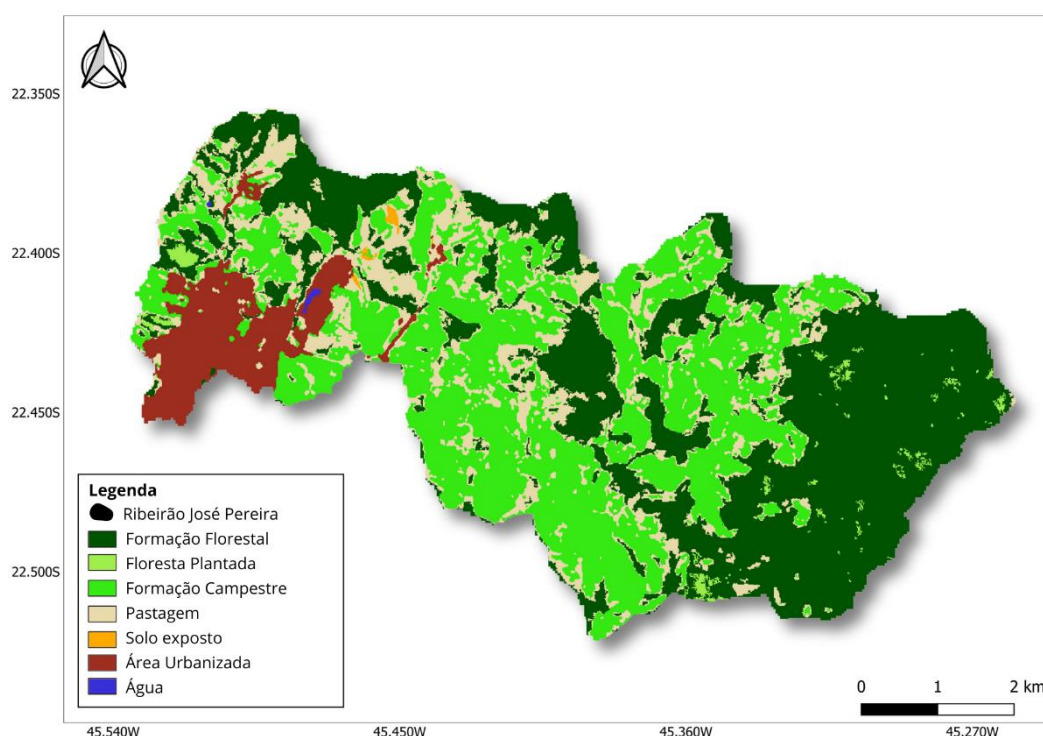


hidromórficas. Os Latossolos, por sua vez, predominam no relevo plano-ondulado, principalmente nos topos de morros, ocupando 6% da área. Os Argissolos, por fim, constituem a classe de solo dominante na sub-bacia, representando 56% da área e ocupando o relevo ondulado e forte ondulado.

#### 4.1.5 Uso e ocupação do solo

A BHRJP é uma região de grande importância ambiental e socioeconômica. Ao longo dos anos, houve um foco considerável nos estudos e investigações sobre a utilização e ocupação do solo nessa área. O objetivo principal tem sido compreender os efeitos das atividades humanas no ambiente e encontrar abordagens sustentáveis para administrar os recursos naturais. Estudos recentes, respaldados por dados do Mapbiomas (2022) com resolução de 10 metros, presentes na Figura 12, têm revelado informações significativas sobre essa região.

Figura 12 - Mapa de Uso e Cobertura do Solo da BHRJP.



Fonte: Autor.

O MDE utilizado para criar o mapa de uso e ocupação do solo BHRJP não é suficientemente alta para representar com precisão a pequena área da bacia. Como resultado, o componente "água" no mapa parece estar em menor proporção do que realmente é observado na realidade da bacia.

Segundo Silva et al. (2016), o uso do solo na bacia do Ribeirão José Pereira é caracterizado por uma mescla de atividades agrícolas, industriais e urbanas. A agricultura, especialmente a produção de café e hortaliças, é uma das principais atividades econômicas da região. No entanto, a expansão das áreas agrícolas tem levado ao desmatamento de áreas de vegetação nativa, aumentando a porcentagem de áreas de pastagens, o que pode comprometer a qualidade da água e afetar a biodiversidade local.

Além da agricultura, a bacia também abriga empreendimentos comerciais e indústrias, principalmente nas proximidades do perímetro urbano. Segundo Souza (2018), essas por sua vez, são responsáveis pela geração de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas, representando potenciais fontes de poluição para o Ribeirão José Pereira. A falta de um adequado tratamento desses efluentes pode causar impactos negativos na qualidade da água e nos ecossistemas aquáticos.

No que se refere à ocupação urbana, o crescimento populacional e a expansão das áreas urbanizadas têm ocorrido de forma desordenada, resultando em problemas de impermeabilização do solo, aumento da taxa de escoamento superficial e redução da infiltração da água no solo. De acordo com Hossu e Pons (2022), houve a recente identificação de novas áreas de solo exposto, especialmente concentradas na região urbana. Essas áreas indicam a presença de processos erosivos, os quais, em sua maioria, parecem ser resultado de ações antrópicas. Esses fatores contribuem para o aumento do volume e da velocidade do escoamento superficial, podendo ocasionar inundações e erosão do solo, como apontado por Oliveira (2017).

#### 4.1.6 Subdivisão da bacia hidrográfica

Para obter acesso ao modelo digital de elevação disponibilizado pelo Topodata do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), foi necessário acessar o site oficial da instituição e realizar o download do arquivo correspondente à área de interesse. No caso específico, a carta utilizada foi nomeada como "22S465ZN" e apresenta uma resolução espacial de 30 metros.

A delimitação das sub-bacias da BHRJP foi realizada no software HEC HMS 4.10, sendo necessário importar os dados de terreno, incluindo o Modelo Digital de Elevação (MDE), especificando coordenadas planas WGS84 23S do local.

Após essa etapa, os dados foram importados para o software, onde foram submetidos a um pré-processamento. Nessa etapa, foram identificados os trechos de fluxos que serviram como indicativo para determinar o tamanho mínimo de área a ser considerado como um trecho

de rio, adotando-se um critério de 2 km no MDE e subdivisão, resultando em um número de sub-bacias. Posteriormente, foi inserido um ponto de exutório na saída da bacia hidrográfica, que representa o ponto de descarga principal de escoamento. Com base nessa delimitação inicial, foram estabelecidos os elementos e junções necessários para a subdivisão da bacia hidrográfica em sub-bacias. Inicialmente, o número de sub-bacias resultantes foi de 11, considerando as características do terreno e o fluxo de drenagem.

Adicionalmente, a análise das condições atuais de uso e ocupação do solo, juntamente com as modificações ocorridas na região de estudo, como a implementação de novas áreas residenciais e comerciais, foi realizada por meio do software Google Earth Pro e do mapa de uso e ocupação do solo. Essa análise permitiu uma melhor compreensão das alterações espaciais e identificação de áreas de interesse para o estudo. Com base nessa nova avaliação, optou-se por redefinir as condições de subdivisão da bacia hidrográfica, totalizando 19 sub-bacias, a fim de refletir de forma mais precisa as características atuais e as novas modificações ocorridas no município de Itajubá.

#### **4.2 Cálculo da curva número (CN)**

Para obtenção dos valores de CN, utilizou-se o mapa pedológico descrito por Lima (2012) (Figura 11) e mapa de uso e ocupação realizado no software QGIS 3.30.1 (Figura 12), criando um mapa resultante com valores de CN. Para isso, iniciou-se com a classificação dos solos em grupos hidrológicos, adaptado para bacias hidrográficas brasileiras, conforme descrito por Menezes et al. (2019), demonstrado na Tabela 7. A partir da tabela fornecida pelos autores, foi possível agrupar os solos e o grupo hidrológico correspondentes para cada sub-bacia, podendo ser visualizado na Tabela 8.

Tabela 7 - Classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras.

<b>Grupo</b>	<b>Características</b>	<b>Tipo de solo</b>
A	Solos muito profundos (> 200 cm), com alta taxa de infiltração e resistência e tolerância à erosão, solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20), textura média, solos bem drenados ou excessivamente drenado.	Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; Latossolo amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.
B	Solos profundos (100 a 200 cm), com moderada taxa de infiltração e resistência e tolerância à erosão, solos porosos variando com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50, textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média.	Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; Latossolo Bruno; Nitossolo Vermelho; Neossolo Quartzarênico; Argissolo Vermelho ou Vermelho Amarelo de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textura labrupta.
C	Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm), baixa taxa de infiltração e baixa resistência à erosão, são solos com gradiente textural maior que 1,50, solos associados a argila de atividade baixa (Tb).	Argissolo pouco profundo, mas não apresentando mudança textural labrupta ou Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho Amarelo e Argissolo Amarelo, ambos profundos e apresentando mudança textural labrupta; Cambissolo de textura média e cambissolo háplico ou húmico, mas com características físicas semelhantes aos Latossolos (latossólico); Espodossolo Ferrocárbico; Neossolo Flúvico.
D	Solos de taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência à erosão, solos rasos (< 50 cm), solos pouco profundos associados à mudanças textura labrupta, solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta), solos orgânicos.	Neossolo Litólico; Organossolo; Gleissolo; Chernossolo; Planossolo; Vertissolo; Alissolo; Luvissolo; Plintossolo; solos de mangue; afloramentos de rocha; Cambissolos que não se enquadram no grupo C; Argissolo Vermelho Amarelo e Argissolo Amarelo, ambos pouco profundos e associados à mudança textura labrupta.

Fonte: Menezes et al. (2019)

Tabela 8 - Classificação hidrológica do solo para BHRJP.

<b>Grupo hidrológico para a BRJP</b>	
Cambissolo Háplico	C
Gleissolo Háplico	D
Latossolo Vermelho	A
Latossolo Vermelho-Amarelo	A
Argissolo Vermelho	C
Argissolo Vermelho-Amarelo	C

Fonte: Autor.

Posteriormente, para a associação das informações dos grupos hidrológicos aos diferentes tipos de uso e ocupação do solo, foram utilizados os valores médios de CN para bacias hidrográficas, elaborados por Santos e Lollo (2016), Soares et al. (2017) e Rezende et al. (2018), demonstradas na Tabela 9.

Tabela 9 - CN para bacias hidrográficas urbanas.

<b>Tipo de Uso</b>	<b>Tipo de Solo</b>			
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Formação Florestal	26	52	62	69
Formação Savânica	46	68	78	84
Formação Campestre	56	75	86	91
Pastagem	25	57	75	83
Agricultura	62	71	78	81
Área Urbanizada	77	85	90	92
Água		100		
Solo Exposto	72	82	87	89

Fonte: Adaptado de Santos e Lollo (2016) Soares et al. (2017) e Rezende et al. (2018).

Com base nas informações coletadas, o CN foi calculado no QGIS usando informações dos grupos hidrológicos e do mapa de uso do solo (Figura 12) do Mapbiomas (2022). Inicialmente, associamos os grupos hidrológicos aos tipos de solo, criando uma nova coluna chamada "GRUPO" na tabela de atributos para designar letras correspondentes a cada tipo de solo, exemplificado na Tabela 7 para o Latossolo Amarelo, identificado como letra A na coluna "GRUPO".

Posteriormente, conectamos os grupos hidrológicos aos usos do solo utilizando a ferramenta vetorial "anunciar atributos por local", resultando na camada CN que detalha os grupos hidrológicos para cada tipo de uso. O cálculo numérico do CN foi realizado com a calculadora de campo do QGIS. Na etapa final, ajustamos a simbologia usando a opção "graduado" para visualizar os valores de CN na bacia.

Para calcular o CN em cada sub-bacia, realizamos uma nova etapa utilizando a ferramenta vetorial "anunciar atributos por local" para unir o mapa de CN ao mapa que divide as sub-bacias, resultando em múltiplos tipos de solo e grupos hidrológicos para cada sub-bacia. Para obter um valor médio de CN por sub-bacia, aplicamos a ferramenta de estatísticas por categoria, selecionando a camada CN e o campo "CN" para calcular a média estatística por sub-bacia, resultando em um novo arquivo contendo os dados de CN médio por sub-bacia.

### **4.3 Coleta e análise dos dados hidrometeorológicos**

#### **4.3.1 Estações pluviométricas e fluviométricas na bacia hidrográfica**

A BHRJP possui uma rede de monitoramento hidrológico composta por postos pluviométricos e fluviométricos, desempenhando papel fundamental na coleta e análise dos dados hidrometeorológicos. Essa rede é crucial para o entendimento e gestão dos recursos hídricos na região. Atualmente, a BHRJP conta com diversas estações que contribuem para a obtenção de dados precisos e confiáveis. Destacam-se as seguintes:

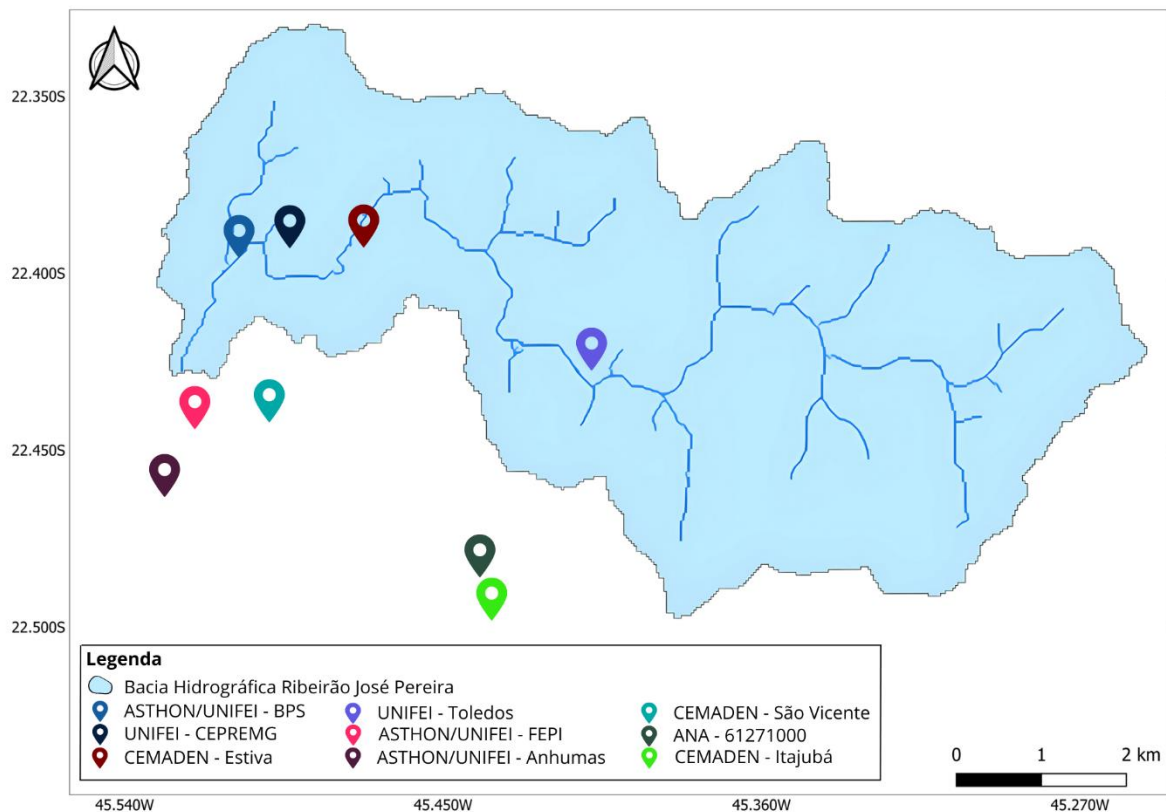
- UNIFEI-CEPREMG: Estação pluviométrica localizada em parceria entre a UNIFEI e o Centro de Pesquisas de Recursos Minerais (CEPREMG). Essa estação é responsável pela coleta de dados pluviométricos da região.
- ASHTON/UNIFEI BPS: Estação que realiza medições pluviométricas e fluviométricas, instalada recentemente em 2022 pela UNIFEI. Além da medição das chuvas, também realiza a leitura do nível do ribeirão, fornecendo informações detalhadas sobre o comportamento hidrológico da bacia.
- CEMADEN-ESTIVA: Estação pluviométrica mantida pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), localizada na região de Estiva.
- UNIFEI-Toledos: Embora não esteja atualmente em operação, essa estação é parte integrante da rede de monitoramento hidrológico da BHRJP e poderá contribuir com informações valiosas para análises hidrometeorológicas futuras.

Além dessas estações, existem outras na região que podem auxiliar na análise hidrometeorológica na BHRJP. Algumas delas são:

- ASTHON/UNIFEI - FEPI: Estação que realiza medições pluviométricas e fluviométricas da UNIFEI, localizada nas proximidades da Faculdade de Engenharia de Itajubá (FEPI).
- CEMADEN - SÃO VICENTE: Estação pluviométrica localizada na região de São Vicente.
- ASTHON/UNIFEI - ANHUMAS: Estação que realiza medições pluviométricas e fluviométricas, situada no bairro Anhumas.
- ANA - 612710000: Estação fluviométrica mantida pela ANA.
- CEMADEN - ITAJUBÁ: Estação pluviométrica localizada em Itajubá.

A localização das estações nas sub-bacias pode ser visualizada na Figura 13. Sequencialmente, estão disponíveis dados das estações na Tabela 10.

Figura 13 – Localização das estações hidrometeorológicas localizadas na BHRJP.



Fonte: Autor.

Tabela 10 - Estações hidrológicas localizadas na BHRJP.

Nome	Operador	Coordenadas		Início da operação	Telemetria	Intervalo de medição
		Latitude	Longitude			
UNIFEI CEPREMG	CEPREMG	22°24'43.21"S	45°26'44.16"O	abril/2010	Sim	10 minutos
ASHTON UNIFEI BPS	UNIFEI	22°24'51.34"S	45°27'0.28"O	nov/2022	Sim	10 minutos
CEMADEN ESTIVA	CEMADEN	22°24'43.65"S	45°26'15.19"O	fev/2018	Sim	10 minutos
UNIFEI Toledos	UNIFEI	22°25'34.10"S	45°24'43.38"O	-	Não	Não está operando
ASTHON UNIFEI - FEPI	UNIFEI	22°25'47.57"S	45°26'52.65"O	nov./2022	Sim	10 minutos
CEMADEN SÃO VICENTE	CEMADEN	22°25'49.96"S	45°27'22.43"O	fev/2018	Sim	10 minutos
ASTHON UNIFEI ANHUMAS	UNIFEI	22°26'15.55"S	45°27'34.85"O	nov/2022	Sim	10 minutos
ANA - 612710000	IGAM MG	22°26'45.95"S	45°25'27.59"O	jan/2016	Sim	1 hora
CEMADEN - ITAJUBÁ	CEMADEN	22°27'2.33"S	45°25'22.95"O	fev/2018	Sim	10 minutos
ANA ITAJUBÁ	IGAM MG	22°26'44.9"S	45°25'27.1"O	jan/1941	Não	15 minutos
ANA SJ DE ITAJUBÁ	IGAM MG	22°22'32.2"S	45°26'48.8"O	jan/1966	Não	1 hora

Fonte: Autor.

#### 4.3.2 Tempo de concentração

Na metodologia deste estudo, a consideração do Tc emerge como um componente crucial para a análise hidrológica. O Tc refere-se ao intervalo de tempo necessário para que a gota d'água percorra toda a extensão da bacia até o exutório. Essa métrica é essencial para entender o comportamento do escoamento superficial e para dimensionar adequadamente



infraestruturas hidráulicas. A determinação  $T_c$  envolve a avaliação de diversos fatores, como a topografia da bacia, a cobertura do solo e a intensidade da precipitação.

Atualmente, não existe uma fórmula específica de tempo de concentração para bacias hidrográficas de Minas Gerais. O  $T_c$  é uma variável hidrológica que depende das características físicas da bacia, tais como a forma, o tamanho, o relevo, o tipo de solo e a cobertura vegetal, além das condições climáticas. No entanto, é possível a comparação entre os dados da bacia e determinar os tempos de concentração a partir de observações, sendo empregadas fórmulas considerando as características mais próximas da BHRJP. Isso permite uma análise abrangente e uma seleção mais precisa dos  $T_c$  mais adequados à bacia em consideração.

Segundo Silveira (2005) a Tabela 11 sintetiza as melhores equações de tempo de concentração tanto para bacias rurais quanto urbanas, com base em estudos considerando erro médio (EM), o erro padrão (EP), o nível de abrangência e a representatividade original das bacias hidrográficas. Estas por sua vez foram utilizadas preliminarmente para cálculo de  $t_c$  na BHRJP.

Tabela 11 - Fórmulas de  $T_c$  recomendadas.

Fonte	Equação	Metodologia
<b>Corps E.</b>	$T_c = 0,191L^{0,76}S^{-0,19}$	Tempo de retardo de MOPU (1987) vezes 1,417
<b>V. Chow</b>	$T_c = 0,160L^{0,64}S^{-0,32}$	Tempo de pico (MOPU, 1987) multiplicado por 1,67
<b>Onda Cinemática</b>	$T_c = 7,35n^{0,6}i^{-0,4}L^{0,6}S^{-0,3}$	Adaptada da $T_c$ apresentada por Kibler (1982)
<b>Kirpich</b>	$T_c = 0,0663L^{0,77}S^{-0,385}$	Adaptada da $T_c$ apresentada por Kibler (1982)
<b>Carter</b>	$T_c = 0,0977L^{0,6}S^{-0,3}$	Adaptada da $T_c$ apresentada por McCuen et al (1984)
<b>Pasini</b>	$T_c = 0,107A^{0,333}L^{0,333}S^{-0,5}$	Adaptada da $T_c$ apresentada por Pfafstetter (1976)
<b>Schaake</b>	$T_c = 0,0828L^{0,24}S^{-0,16}A_{imp}^{-0,26}$	Adaptada da $T_c$ apresentada por Shaaake et al (1967)
<b>Desbordes</b>	$T_c = 0,0869A^{0,3039}S^{-0,3832}A_{imp}^{-0,4523}$	Tempo de retardo de Desbordes multiplicado por 1,417

Fonte: Adaptado de Silveira (2005).

Na Tabela 11,  $L$  denota o comprimento da principal drenagem do manancial, expresso em quilômetros. O parâmetro  $S$  refere-se ao desnível, medido em metros, enquanto a área, representada por  $A$ , deve ser fornecida em quilômetros quadrados. As variáveis  $A_{imp}$  e  $p$  indicam a fração de área impermeável e a fração de área com vegetação, respectivamente,

ambas variando de 0 a 1. A intensidade da chuva,  $i$  é expressa em milímetros por hora, sendo a referência mencionada por McCuen et al. (1984) de 35 mm/h. Além disso, a rugosidade  $n$  corresponde à rugosidade de Manning.

O comprimento do talvegue, o desnível, a porcentagem urbanizada e a área rural da BHRJP foram adquiridos por meio do software HEC-HMS, juntamente com a área total da bacia. A seleção do coeficiente de Manning baseou-se nos dados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores de  $N$  da equação de Kerby-Hathaway.

<b>Características da superfície</b>	<b>N</b>
Pavimento alisado	0,02
Cobertura com grama rala	0,03
Cobertura com grama média	0,04
Cobertura com grama espessa	0,08

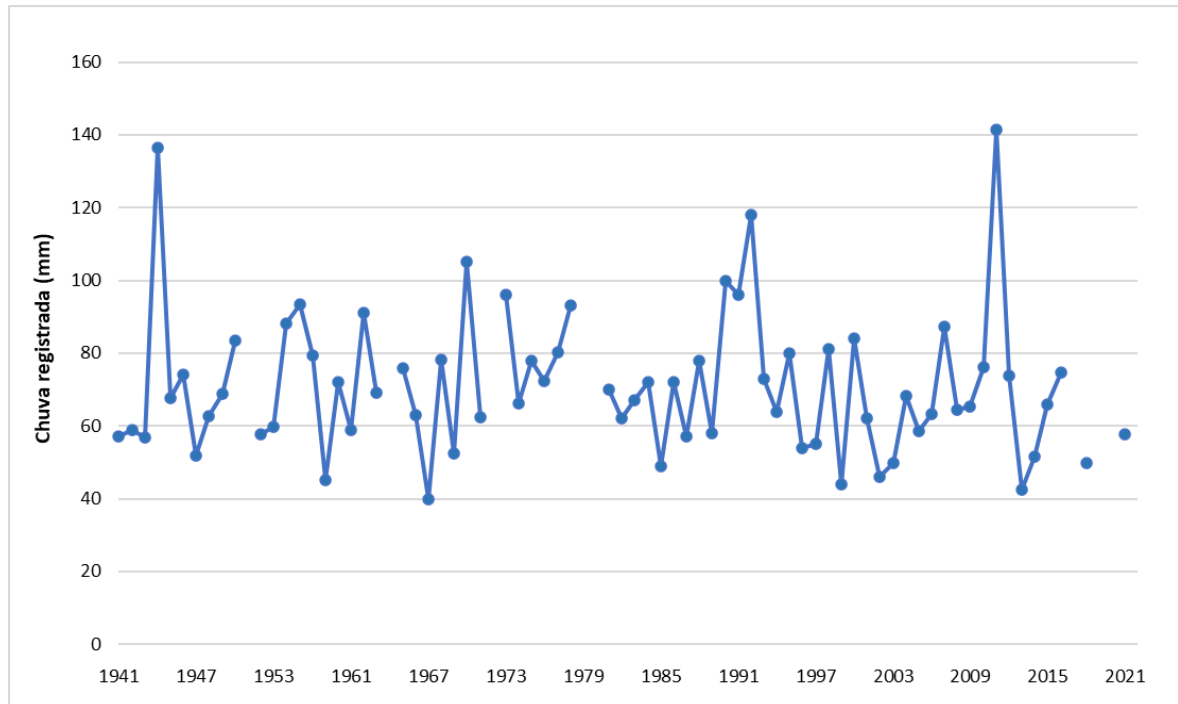
Fonte: Adaptado de Silveira (2005).

Inicialmente, procedeu-se aos cálculos do  $tc$  por meio de fórmulas empíricas, com o intuito de compreender o comportamento hidrológico da bacia da BHRJP. Em uma etapa subsequente, procedeu-se à calibração desse parâmetro no software HEC-HMS, utilizando dados de eventos observados, incluindo informações detalhadas sobre precipitação, nível e vazão. Esses resultados calibrados serão discutidos nas seções posteriores, contribuindo para uma análise mais aprofundada da dinâmica hidrológica da área em estudo.

#### 4.3.3 Análise de chuvas máximas

A análise das precipitações é essencial, pois os hietogramas de chuvas fazem parte dos parâmetros de entrada no software HEC-HMS. Devido ao tempo de coleta de dados das estações localizadas no interior da BHRJP, foram utilizadas as estações da ANA nomeada como Itajubá (2245073) que tem período de leitura de dados de 1941 a 1966 e a estação São João de Itajubá (2245083) com período de dados de 1966 a 2022, as quais juntas formam uma série histórica de 81 anos (Figura 14) e, posteriormente, na fase de simulação, será utilizada a estação ASHTON/UNIFEI BPS para calibração dos dados considerando os eventos de inundações mais recentes ocorridos na BHRJP. Na análise de chuvas máximas foram excluídos os anos hidrológicos que demonstraram falhas em meses do período chuvoso.

Figura 14 - Chuvas diárias máximas anuais no município de Itajubá (Composição das séries históricas dos postos Itajubá e São João de Itajubá).



Fonte: Autor.

A análise de chuvas máximas visa estimar as vazões necessárias para o planejamento de infraestruturas hidráulicas, considerando a probabilidade de eventos de chuva intensa. Neste estudo, utilizou-se a distribuição Log-Normal devido às suas propriedades estatísticas, capacidade de modelar a precipitação em diferentes escalas temporais e adequação à natureza assimétrica dos dados de chuva. Essa escolha é respaldada pela capacidade da distribuição em lidar com variáveis positivas, refletindo a característica da precipitação, e capturar eventos extremos, essenciais para garantir a confiabilidade e segurança das estruturas hidráulicas.

Posteriormente aos cálculos, foi possível verificar o ajuste entre os dados observados de chuvas e os dados gerados pela distribuição log-normal. Para tal, foi realizado um gráfico de dispersão e a partir da análise visual do gráfico, onde busca-se identificar a proximidade entre os pontos dispersos e uma linha de referência diagonal, que representaria um ajuste perfeito entre os dados observados e os gerados pela distribuição log-normal.

A partir do gráfico de dispersão e da análise do tempo de concentração da bacia hidrográfica, foi possível empregar o método das relações de durações com coeficiente de desagregação pluviométrica, o qual consiste na decomposição das chuvas em diferentes durações e intensidades, permitindo uma melhor compreensão dos padrões de distribuição temporal e espacial dos eventos pluviométricos (Tabela 2).

## 4.4 HEC-HMS

### 4.4.1 Calibração do modelo

#### 4.4.1.1 Modelo de Bacia

O processo de simulação no software HEC-HMS envolve várias etapas fundamentais. Após a realização da subdivisão da bacia hidrográfica, por meio da utilização de algoritmos de agrupamento, foi possível automatizar a definição do modelo de bacias (*Basin Model*) no software HEC-HMS, resultando na geração automática dos trechos de rios, junções e demais elementos hidrológicos, além das principais características das sub-bacias e trechos de rios.

Além da execução das delimitações e da geração dos elementos principais, é imprescindível incorporar os valores de CN no método de perda, conforme delineado na seção 4.2 deste estudo. O método SCS (Serviço de Conservação do Solo) foi escolhido como o método a ser aplicado a todas as sub-bacias. Adicionalmente, são necessárias algumas informações para o software, incluindo dados sobre a perda e a porcentagem de impermeabilização, determinada por meio de uma média obtida no Google Earth. Além disso, se faz necessário o fornecimento de informações pertinentes ao Lag Time, definido como 60% do tempo de concentração, cujo valor é obtido por meio de cálculos realizados conforme descrito na seção 4.3.2 deste trabalho.

A metodologia que será adotada para a propagação do escoamento nos trechos de rio foi o método Muskingum-Cunge. Como medida preliminar à calibração, foi selecionado o coeficiente de Manning de 0,035, que é comumente aplicado em canais abertos, para os cálculos hidrológicos. Também foram consideradas as junções como direcionadoras do fluxo de água na bacia, guiando-o no sentido a jusante.

#### 4.4.1.2 Modelo Meteorológico

O modelo meteorológico destaca-se por sua capacidade de discernir e modelar com precisão o comportamento das chuvas em cada sub-bacia, permitindo uma avaliação abrangente de diferentes padrões pluviométricos em diversas partes da bacia hidrográfica. Por exemplo, ao ocorrer uma chuva apenas na área urbanizada, é possível selecionar uma resposta específica apenas para essa região, repetindo o processo para as demais sub-bacias.

Da mesma forma, o modelo viabiliza a análise de uma variedade de cenários, incluindo eventos de chuva distribuídos de maneira homogênea por toda a extensão da bacia. É importante

destacar que a definição desses diferentes padrões de chuva, que será detalhada posteriormente, baseia-se em uma série histórica de dados coletados ao longo de 10 anos na estação UNIFEI.

#### *4.4.1.3 Especificações de controle*

Na etapa de especificações de controle para o modelo de bacia, foram utilizados os dados fornecidos pela estação UNIFEI, que contém informações relevantes sobre eventos recentes de inundação na bacia de estudo. Esses dados foram empregados na calibração e validação do modelo de bacia, garantindo sua precisão e confiabilidade na simulação de eventos futuros.

Para utilizar as especificações de controle é fundamental configurar corretamente os parâmetros da bacia hidrográfica. Isso inclui definir a data e horário de início e término da simulação, bem como o intervalo desejado para a análise. Ao considerar dados de precipitação a cada 10 minutos como se é encontrado na série histórica da estação UNIFEI, a simulação é ajustada para gerar uma resposta de vazão a cada intervalo de 10 minutos.

#### *4.4.1.4 Eventos selecionados para calibração do modelo*

Com a finalidade de calibrar o modelo hidrológico, foram selecionados eventos de inundação previamente registrados BHRJP. Essa decisão fundamentou-se principalmente na observação e análise de eventos históricos de inundação, para isso foram empregados os seguintes critérios:

- 1) Observação de cheias ou transbordamentos no Ribeirão José Pereira durante o período chuvoso de 2022-2023.
- 2) Dados consistentes na série de precipitação em uma estação pluviométrica mais próxima da seção de controle de nível do Ribeirão José Pereira nomeada como ASTHON/UNIFEI BPS.
- 3) Disponibilidade de registros de dados de nível da estação ASTHON/UNIFEI BPS para cada um dos eventos para posteriormente aplicação da curva chave específica da estação e assim conseguirmos determinar as vazões correspondentes às seções analisadas.

Selecionado os eventos, dados de precipitação e dados de nível foi possível utilizar a curva-chave representativa das vazões do Ribeirão José Pereira na Equação elaborada por Marciano e Silva (2023) representada pela fórmula (3).

$$Q = a(h - h_0)^n \quad \text{Equação (3)}$$

Sendo:

$$a = 1,4516$$

$$n = 2,396$$

$$h_0 = 840,03$$

#### *4.4.1.5 Dados de série temporal*

##### *4.4.1.5.1 Precipitação*

Para a manipulação dos dados pluviométricos na simulação, integramos o componente nomeado como "medidores de precipitação". Neste componente, incorporamos a precipitação desejada, configurando precisamente o período de início, término e o intervalo de tempo da simulação. Para essa calibração foram utilizados os dados de precipitação provenientes da série de dados da estação UNIFEI. É importante que esse intervalo coincida com as especificações de controle, sendo, no nosso caso, estabelecido em 10 minutos. Nessa fase, é possível criar variados eventos de chuva para um mesmo dia, o que viabiliza a modelagem de variações na intensidade e duração em distintas regiões ou sub-bacias. Desta forma, podemos associar eventos pluviométricos específicos a sub-bacias particulares nas especificações de controle, proporcionando uma simulação mais representativa. Um exemplo dessa caracterização seria criar cenários em que a chuva é mais concentrada e de maior duração em uma ou mais sub-bacias, enquanto em outra, a precipitação ocorre de forma mais espaçada e em menor quantidade e assim, posteriormente, associá-las.

##### *4.4.1.4.2 Vazão*

Da mesma maneira que nas configurações de precipitação, durante a fase de calibração do modelo utilizamos dados de vazão, que são dados provenientes do cálculo da curva-chave com registros de nível da estação ASTHON/UNIFEI BPS, e inserimos no componente denominado "medidores de vazão". Nesse processo, foram inseridos dados no mesmo período de início, fim e intervalo de tempo. Essa estação está situada em frente à UNIFEI e é estratégica para compreender o comportamento do Ribeirão durante eventos específicos de chuva na região. O seu posicionamento abrange o início do transbordamento e uma parte urbanizada, possibilitando a observação direta da ocorrência de inundação.

#### 4.4.1.6 Ajustando parâmetros no HEC-HMS

Após a elaboração do modelo de bacia hidrográfica, a simulação comparou dados de nível observados e vazão simulada. A etapa seguinte avaliou o ajuste de parâmetros no HEC-HMS. A análise preliminar da precipitação total é crucial para interpretar simulações, indicando se a chuva está bem representada. Divergências entre vazão simulada e observada podem revelar subestimação ou superestimação, sugerindo ajustes no modelo.

Além disso, o parâmetro CN, refletindo a infiltração do solo, é crucial na previsão do pico de vazão. Diferenças entre picos simulados e observados podem indicar necessidade de ajuste no valor do CN. O *lag time*, intervalo entre início da precipitação e pico de vazão, influencia a resposta do sistema. Além disso, a declividade afeta a velocidade do escoamento, e o coeficiente de Manning influencia a representação da velocidade, ambos impactando o pico de vazão simulado. Por fim, outro parâmetro de sugestão para ajuste é abstração inicial, necessários para uma representação precisa da resposta hidrológica da bacia.

De forma geral, após a inserção dos dados com as configurações iniciais e parâmetros conhecidos de acordo com as informações do MDE, realizou-se a primeira simulação do modelo HEC-HMS. Observando o comportamento do escoamento e, caso não tenha obtido um bom ajuste, representado pelo coeficiente NASH, deu-se início à fase de ajustes dos parâmetros. Com os parâmetros calibrados, o modelo será representado por um desempenho satisfatório, permitindo iniciar simulações de novos eventos para a BHRJP.

#### 4.4.2 Simulação de eventos de inundação

Após a conclusão do processo de calibração, que considerou nos eventos os registros pluviométricos e registros de nível no Ribeirão José Pereira, obtivemos informações cruciais sobre os parâmetros calibrados para a BHRJP. Esses parâmetros são fundamentais para a realização de simulações que visam antecipar potenciais eventos futuros.

As simulações foram elaboradas com base em registros de chuvas frequentemente observadas na estação UNIFEI durante o período entre julho de 2013 e agosto de 2023. Para determinar quais registros seriam considerados nessas simulações, levou-se em consideração vários fatores. Isso incluiu uma análise detalhada das chuvas máximas diárias na BHRJP, bem como o conhecimento derivado dos coeficientes de desagregação aplicados aos cálculos para períodos de retorno (TR) de 2, 10, 50 e 100 anos.

Com eventos selecionados, registrados entre julho de 2013 e agosto de 2023 na bacia, e o modelo devidamente calibrado, foram realizados ajustes adicionais necessários para otimizar

o processo de simulação. Isso incluiu a definição do horário de início e término da simulação, considerando um período de 24 horas. Geralmente, as simulações foram configuradas para iniciar às 12h00 do primeiro dia de registros e encerrar às 12h00 do segundo dia, com um intervalo de tempo de simulação de 10 minutos, equivalente ao registro dos dados pluviométricos. Essas condições foram incorporadas às especificações de controle no HEC-HMS, considerando os dados da estação UNIFEI para toda a BHRJP.

Adicionalmente, para garantir a precisão das simulações, foi necessário incorporar os dados pluviométricos necessários ao início do processo. Os demais parâmetros essenciais para a execução da simulação já estavam configurados a partir da fase de calibração. Assim, uma vez inseridos os dados pluviométricos e as demais condições ajustadas, as simulações puderam ser iniciadas, permitindo uma análise aprofundada dos potenciais cenários de inundação na BHRJP.

Uma maneira de analisar o gráfico gerado pelo HEC-HMS, além da comparação visual entre os dados de vazão observada e simulada, é por meio do coeficiente de Nash. Relembrando, esse parâmetro, variando de  $-\infty$  a 1, oferece uma medida quantitativa da concordância entre as séries temporalmente variáveis. Quanto mais próximo o coeficiente de Nash estiver de 1, maior é a concordância entre os dados observados e simulados, indicando uma representação mais precisa do modelo hidrológico em relação aos eventos de vazão. Os valores recomendados de performance de Nash recomendados por Moriasi et al. (2007) são descritos na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores recomendados de performance para simulações.

<b>Valores de performance recomendados</b>	<b>Coefficiente de Nash</b>
Muito bom	0,75 a 1,00
Bom	0,65 a 0,75
Satisfatório	0,5 a 0,65
Insuficiente	<0,5

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2007).

#### **4.5 Limiares de inundação**

O limiar de inundação é um elemento crítico na análise e compreensão dos eventos meteorológicos que podem resultar em transbordamento ou inundação nessa região. Um dos desafios na determinação do limiar está na consideração da saturação do solo. Esta condição varia ao longo do tempo e é influenciada por diversos fatores, incluindo precipitações anteriores, características do solo e a estação do ano.



Além disso, a localidade específica onde a chuva na bacia ocorre é um aspecto crucial. Se a precipitação é concentrada apenas em áreas urbanizadas ou se abrange toda a extensão da bacia, essas diferenças geográficas podem impactar significativamente o limiar de inundação. Chuvas intensas e concentradas em um curto período de tempo, por exemplo, podem superar o  $t_c$ , impedindo que a BHRJP tenha tempo necessário para armazenar e escoar a água de maneira eficaz, levando a eventos de inundação. Por outro lado, chuvas espaçadas ao longo das 24 horas podem influenciar diretamente a saturação do solo, impactando a capacidade de absorção.

Na etapa de seleção dos eventos para simulação, avaliamos todos os cenários de precipitações que impactam a bacia hidrográfica. Durante a simulação, identificamos eventos que resultam em transbordamento da cota crítica de 1,5 metros, indicando potenciais inundações. Para estabelecer o limiar de acumulado de precipitação indicativo de inundação na BHRJP, examinamos a distribuição de chuva, identificando a quantidade mínima de precipitação necessária para que o Ribeirão ultrapasse os 1,5 metros em todos os eventos selecionados. Os valores mínimos acumulados foram então plotados em um gráfico, incluindo eventos concentrados e distribuídos. Realizou-se uma regressão linear para determinar a curva sobre a quantidade mínima de chuva acumulada que sugere inundação, indicando que, ao iniciar a chuva e durante o evento, ultrapassar a curva linear do acumulado mínimo, desencadearia um alerta sobre a probabilidade de inundação.

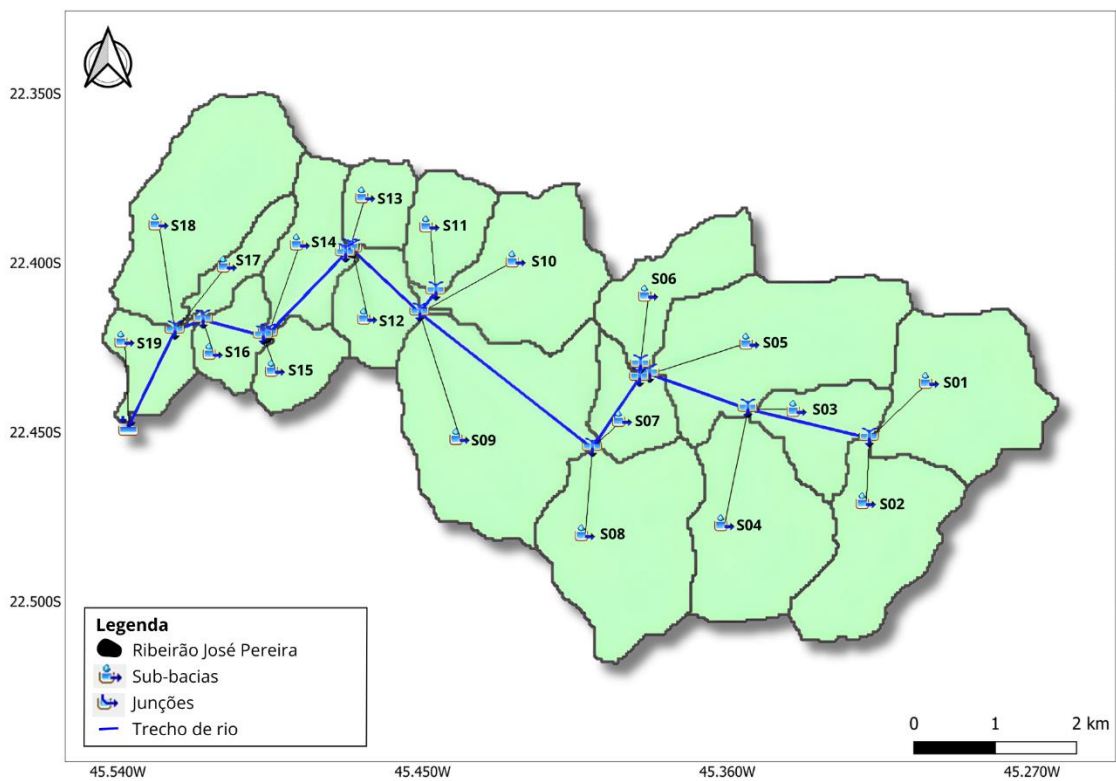
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Discretização hidrológica e dados de entrada do modelo

#### 5.1.1 Subdivisão da bacia hidrográfica

O mapa resultante da divisão em sub-bacias representando as 19 sub-bacias são definidas e identificadas na Figura 15. Onde as sub-bacias 1 a 10 estão localizadas na área rural da BHRJP e sub-bacias numeradas de 11 a 19 localizadas na área urbanizada.

Figura 15 - Sub-bacias da BHRJP.



A Tabela 14 apresenta informações sobre as características das sub-bacias, incluindo sua área, o comprimento do talvegue principal (linha mais baixa da bacia), o desnível e a declividade. Cada sub-bacia é identificada numericamente de 1 à 19. Com as informações coletadas, pode-se perceber que a menor sub-bacia é nomeada como 17, totalizando uma área de 0,664 km<sup>2</sup> e a maior sub-bacia a número 9, com uma área de 4,781 km<sup>2</sup>.

Tabela 14 - Informações das sub-bacias.

<b>Sub-bacia</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>L (talvegue) (km)</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b>S (m/m)</b>
<b>1</b>	3,15	1,41	480,20	0,064
<b>2</b>	2,72	1,30	469,74	0,052
<b>3</b>	1,32	0,98	409,52	0,129
<b>4</b>	3,13	1,29	715,43	0,067
<b>5</b>	3,98	2,09	540,67	0,034
<b>6</b>	1,64	1,34	286,04	0,013
<b>7</b>	1,01	0,65	220,21	0,052
<b>8</b>	3,65	1,23	491,96	0,046
<b>9</b>	4,78	2,12	374,81	0,005
<b>10</b>	2,65	1,77	338,40	0,041
<b>11</b>	1,15	0,86	218,20	0,018
<b>12</b>	1,14	0,74	121,32	0,006
<b>13</b>	0,79	0,68	207,77	0,025
<b>14</b>	1,45	1,21	236,93	0,003
<b>15</b>	0,87	0,35	151,84	0,002
<b>16</b>	0,83	0,47	96,61	0,002
<b>17</b>	0,66	1,27	184,21	0,029
<b>18</b>	3,48	1,94	302,05	0,009
<b>19</b>	0,96	0,95	141,79	0,00032

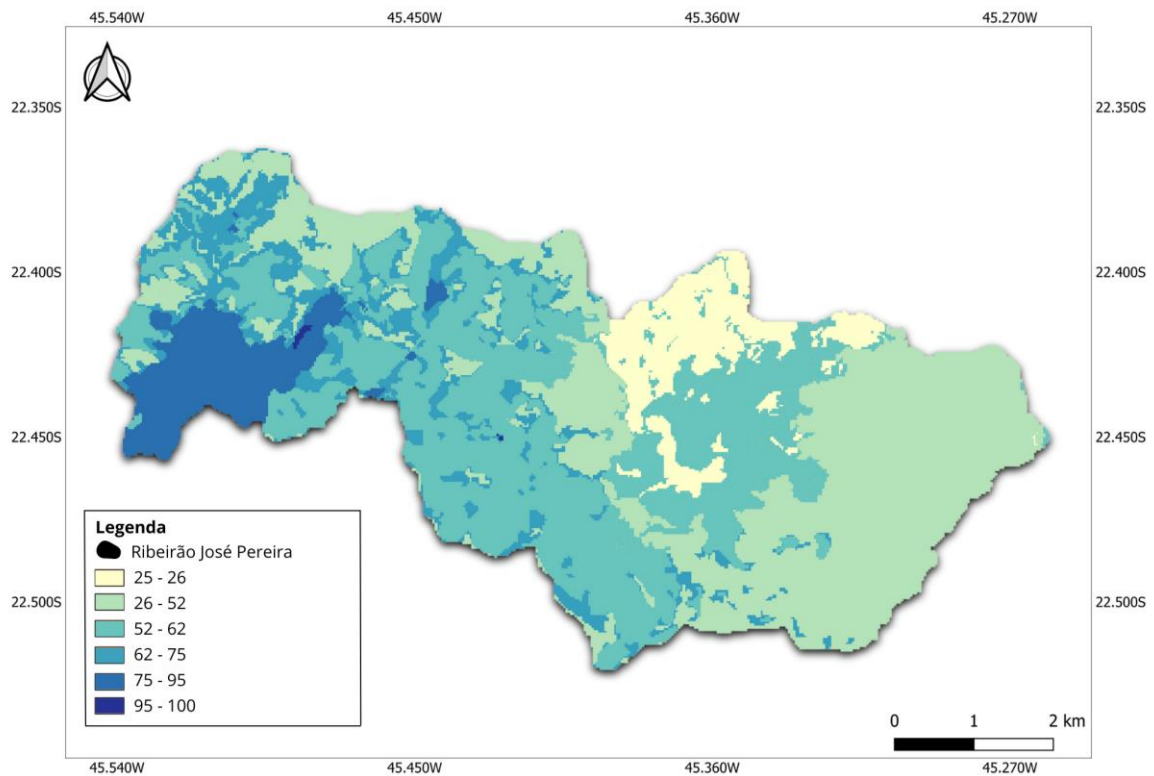
Em relação ao talvegue, a menor extensão é de 0,351 km, encontrada na sub-bacia 15, enquanto a maior extensão é de 2,115 km, presente na sub-bacia 9. Já nos dados de desnível, a menor diferença de elevação é de 96,618 metros, atribuída à sub-bacia 16, e a maior diferença é de 715,43 metros, observada na sub-bacia 4. Por fim, na coluna das declividades, o menor valor de inclinação é de 0,00032 m/m, relacionado à sub-bacia 19, enquanto o maior valor é de 0,129 m/m, pertencente à sub-bacia 3. Essas variações destacam a heterogeneidade das características topográficas e hidrológicas das sub-bacias, mostrando a diversidade das áreas em estudo.

#### 5.1.2 Cálculo da Curva Número (CN)

Com base nos dados fornecidos, criou-se um mapa de escoamento superficial (Figura 16) que ilustra as regiões com seus respectivos CNs. As áreas mais claras do mapa, que

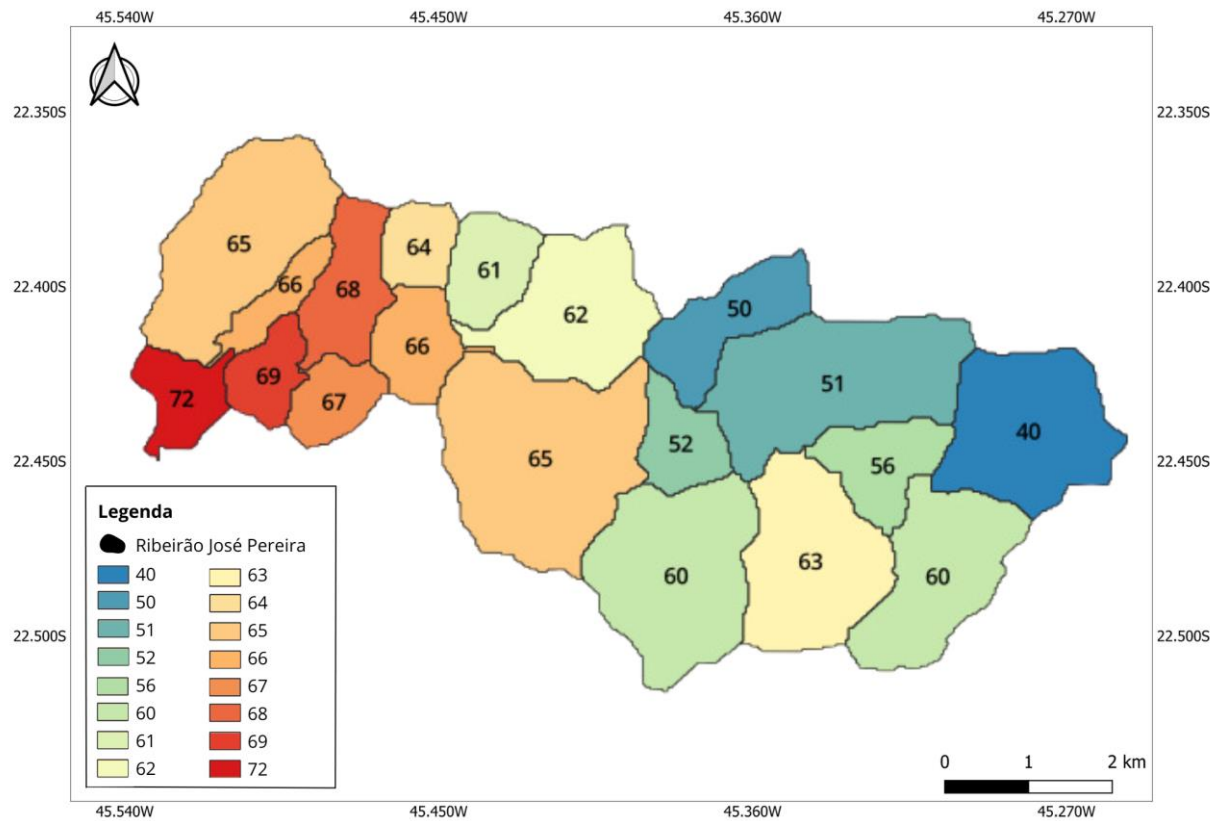
correspondem aos valores mais baixos, indicam uma menor probabilidade de escoamento superficial e uma maior capacidade de infiltração do solo. Por outro lado, as áreas com valores mais elevados sinalizam um maior potencial de escoamento superficial e uma menor capacidade de infiltração.

Figura 16 - Valores de CN para a BHRJP.



Os dados coletados permitem uma análise mais precisa das características hidrológicas de cada sub-bacia, permitindo a identificação das áreas que apresentam maior ou menor potencial de escoamento superficial sendo demonstrado na Figura 17.

Figura 17 - Valores de CN médio para a cada sub-bacia da BHRJP.



Para fins de melhor visualização, na Tabela 15 há informações do número de sub-bacias com seu respectivo CN. A análise dos valores de CN das sub-bacias revela informações cruciais sobre suas características hidrológicas. Observa-se que a sub-bacia 19 apresenta o CN médio mais elevado em comparação com as demais, indicando uma maior susceptibilidade a enchentes e inundações. Esse resultado é particularmente significativo, pois a sub-bacia 19 está localizada na área mais urbanizada da região. O elevado valor do CN reflete a presença de superfícies impermeáveis, como ruas, calçadas e edifícios, que limitam a capacidade de infiltração da água no solo. Portanto, é esperado que essa sub-bacia experimente uma maior quantidade de escoamento superficial durante eventos de precipitação intensa.

Tabela 15 - CN Sub-bacias.

Sub-bacias da área rural		Sub bacias da área urbanizada	
Sub-bacia	CN Médio	Sub-bacia	CN Médio
<b>1</b>	40	<b>11</b>	62
<b>2</b>	60	<b>12</b>	66
<b>3</b>	63	<b>13</b>	64
<b>4</b>	56	<b>14</b>	68
<b>5</b>	51	<b>15</b>	67
<b>6</b>	50	<b>16</b>	66
<b>7</b>	60	<b>17</b>	65
<b>8</b>	52	<b>18</b>	66
<b>9</b>	61	<b>19</b>	72
<b>10</b>	65		

Por outro lado, a sub-bacia 1 demonstra o CN médio mais baixo, sugerindo uma maior capacidade de absorção e infiltração de água no solo. Isso pode ser atribuído à presença de uma cobertura vegetal mais densa e a uma menor quantidade de áreas impermeáveis. A vegetação atua como um eficiente mecanismo de interceptação e absorção de água, promovendo uma maior infiltração e diminuindo o escoamento superficial. Portanto, espera-se que a sub-bacia 1 seja menos suscetível a enchentes e inundações, devido à sua maior capacidade de retenção e infiltração.

### 5.1.3 Tempo de Concentração

Para a análise preliminar  $T_c$  neste estudo, foram utilizados dados referentes à área da bacia, comprimento do rio principal e declividade, obtidos pelo HEC-HMS (Tabela 13). Os cálculos de acordo com cada metodologia para a BHRJP podem ser visualizados na Tabela 16.

Área (A) = 39,5 km<sup>2</sup>

Comprimento do talvegue principal (L) = 16 km

Desnível = 618,81 (m)

Declividade média = 0,04 (m/m)

Tabela 16 - Tempo de concentração (Tc) em minutos para a BHRJP.

<b>Tempo de concentração (minutos)</b>							
<b>Corps E.</b>	<b>V. Chow</b>	<b>Onda Cinemática</b>	<b>Kirpich</b>	<b>Carter</b>	<b>Pasini</b>	<b>Schaake</b>	<b>Desbordes</b>
174,00	158,77	180,06	116,32	81,36	274,92	22,13	71,70

A fim de facilitar os cálculos necessários para determinar a declividade e o tc em cada região, foi utilizada a subdivisão anteriormente realizada com 19 sub-bacias, os dados como área (km<sup>2</sup>), comprimento do talvegue principal (km), desnível (m) inclinação ou variação de altura em relação à distância percorrida (m/m) podem ser visualizados na Tabela 13. Essa abordagem permitiu uma análise mais precisa e detalhada do comportamento do tc em cada uma dessas sub-bacias, podendo ser visto na Tabela 17.

Tabela 17 - Tempo de concentração (Tc) em minutos para cada sub-bacia.

<b>Tempo de concentração (minutos)</b>								
<b>Sub-bacia</b>	<b>Corps E.</b>	<b>V. Chow</b>	<b>Onda Cinemática</b>	<b>Kirpich</b>	<b>Carter</b>	<b>Pasini</b>	<b>Schaake</b>	<b>Desbordes</b>
<b>1</b>	25,1	28,88	36,43	14,97	16,46	41,86	11,46	28,68
<b>2</b>	24,47	29,2	36,81	15,17	16,63	42,88	11,61	30,22
<b>3</b>	16,71	18,31	23,77	8,65	10,74	19,55	9,4	19,63
<b>4</b>	23,16	26,73	33,88	13,64	15,31	39,32	11,11	27,26
<b>5</b>	38,15	45,38	55,65	25,78	25,14	70,45	13,92	41,05
<b>6</b>	32,79	46,8	57,29	26,75	25,88	74,07	14,66	52,36
<b>7</b>	14,42	18,68	24,22	8,86	10,94	24,45	9,82	24,42
<b>8</b>	24,11	29,44	37,09	15,32	16,76	49,59	11,7	31,25
<b>9</b>	54,84	83,02	98,05	53,32	44,3	190,91	18,82	84,18
<b>10</b>	32,5	38,51	47,72	21,16	21,56	53,18	13	36,4
<b>11</b>	21,88	31,42	39,43	16,57	17,82	47,49	12,44	39,86
<b>12</b>	23,8	39,92	49,35	22,09	22,3	76,24	14,19	56,99
<b>13</b>	17,08	24,19	30,86	12,09	13,94	32,81	11,13	32,61
<b>14</b>	38,84	66,41	79,53	40,76	35,93	131,47	17,6	83,43
<b>15</b>	17,05	36,65	45,56	19,94	20,58	100,31	14,44	72,58
<b>16</b>	20,38	40,81	50,39	22,69	22,77	95,62	14,87	71,83
<b>17</b>	26,95	34,7	43,27	18,66	19,55	35,49	12,67	37,43
<b>18</b>	46,15	65,53	78,55	40,12	35,49	125,54	16,83	65,94
<b>19</b>	32,69	58,19	70,27	34,77	31,75	109,83	16,8	79,84

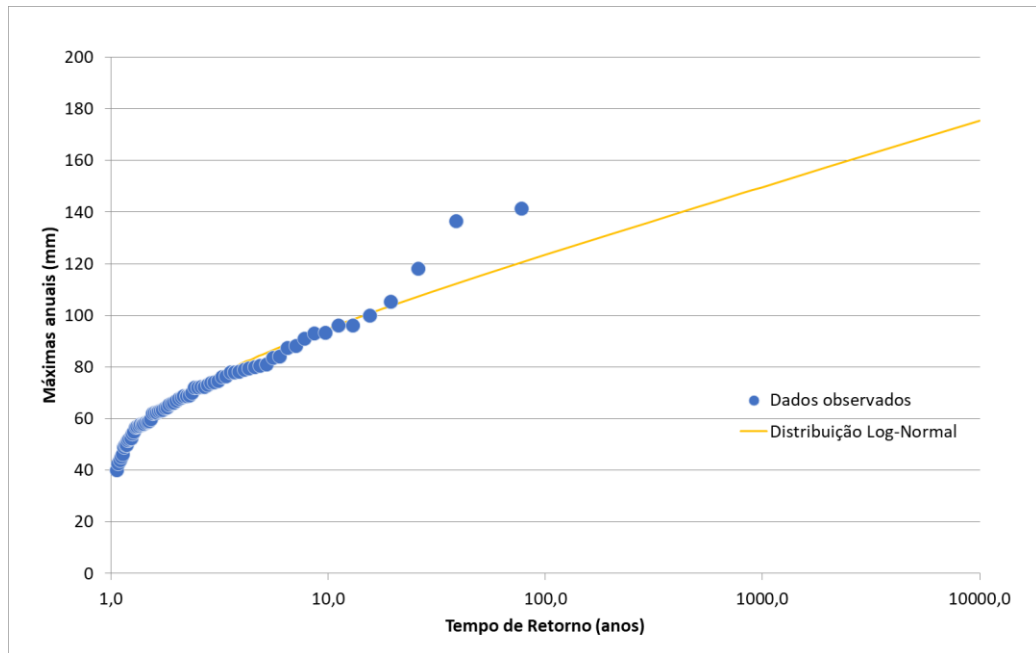
Dentre as fórmulas descritas por Silveira (2005), os resultados mais promissores foram alcançados pelo conjunto de métodos propostos por Kirpich, Ven te Chow e Corps of Engineers. Entretanto, o  $T_c$  escolhido foi de Ven te Chow, por conta das características físicas da bacia. A fórmula de Ven te Chow e Kirpich apresentam faixas amplas de áreas de bacias com bons resultados. A fórmula de Kirpich é ideal para faixa de 150 a 12.000 km<sup>2</sup>, enquanto a fórmula de Ven te Chow abrange a faixa de 1 a 12.000 km<sup>2</sup>, indicando similaridade com a bacia hidrográfica de estudo. Para os resultados das demais fórmulas algumas características podem tendenciar os resultados, superestimando ou subestimando como o caso da metodologia de Corps of Engineers onde o ideal é inseri-la em grandes bacias rurais (até cerca de 12.000 km<sup>2</sup>). Posteriormente, durante a etapa de calibração, os dados de  $T_c$  foram comparados com os dados observados na bacia, representadas pelo parâmetro de *lag time*. Nos casos que houve discrepâncias entre os dados, foram empregadas outras metodologias, conforme descritas na Tabela 16. Esses resultados serão abordados de forma mais detalhada na seção dedicada à calibração do modelo HEC-HMS.

#### 5.1.4 Chuvas intensas na bacia

Após aplicar a distribuição de probabilidade log-normal como referência, realizou-se a construção de um gráfico de dispersão (Figura 18) para verificar a concordância dos dados coletados pelas estações pluviométricas. A partir dessa análise, foram obtidos os valores da média dos logaritmos, o qual totalizou 4,229, e o desvio padrão, que apresentou um resultado de 0,252. Ao observar visualmente o gráfico de dispersão, foi possível avaliar a relação entre os dados observados e a distribuição log-normal esperada.



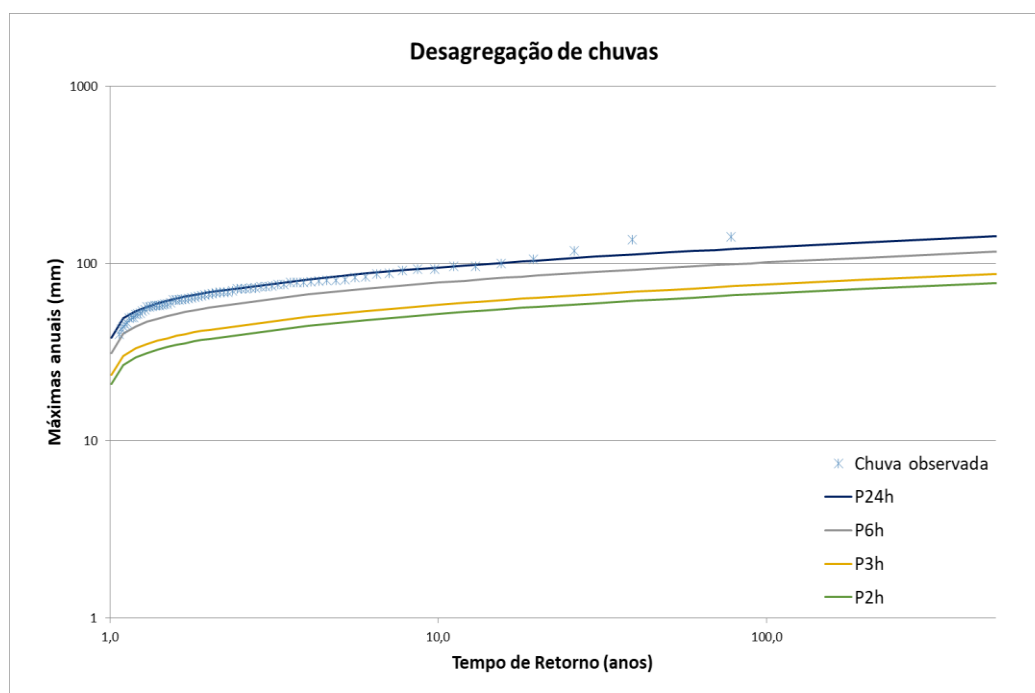
Figura 18 - Dados de observados e dados distribuição Log-Normal.



Ao analisar o gráfico de dispersão é possível verificar que o ajuste entre os dados observados e os dados calculados pela distribuição log-normal é eficiente para projeções de até cerca de 30 anos. No entanto, para períodos superiores a esse limite, as análises conduzidas podem introduzir incertezas na validação dos dados, demandando uma abordagem cautelosa diante da extensão temporal considerada.

Após a análise da distribuição de probabilidade log-normal e com base no  $T_c$  estimado em cerca de 2,65 horas, utilizando a metodologia de Ven te Chow, seus respectivos tempos de retorno e probabilidades, procedeu-se ao cálculo da desagregação de chuvas. Os resultados dessa análise estão representados na Figura 19, onde foram desagregados para eventos menores de 2, 3 e 24 horas, proporcionando uma análise mais detalhada da distribuição da chuva em diferentes intervalos de tempo para a BRJP.

Figura 19 - Chuvas observadas com a desagregação da distribuição log-normal para 2, 3, 6 e 24h.



## 5.2 HEC-HMS

### 5.2.1 Calibração do modelo

#### 5.2.1.1 Eventos selecionados para calibração do modelo

Inicialmente, foram identificados cinco eventos de acordo com os critérios estabelecidos, datados sequencialmente em 18/10/2022, 09/11/2022, 12/01/2023, 23/01/2023 e 15/02/2023. Contudo, três desses eventos não puderam ser utilizados devido à complexidade na interpretação dos gráficos de nível, que apresentavam intervalos na escala de 6 horas ou eram registrados em escala diária. Visando representar de maneira fiel o comportamento dos eventos já ocorridos, utilizando dados confiáveis de precipitação e nível que abrangem o início e o término de cada evento, optou-se por empregar os eventos ocorridos nos dias 18/10/2022 e 23/01/2023 para a calibração do modelo. Os dados dos eventos como duração, horário de início de final de evento e registros podem ser visualizados na Tabela 18.

Tabela 18 – Descrição dos eventos utilizados para calibração.

	18/10/2022	23/01/2023
<b>Precipitação total</b>	51,80mm	40,80mm
<b>Início e final do evento</b>	19h00-23h00	20h00-22h30
<b>Intervalo de medição</b>	10 em 10 minutos	10 em 10 minutos
<b>Nível atingido</b>	1 metro	2 metros

Com base na metodologia delineada por Marciano e Silva (2023), tornou-se viável empregar a equação da curva-chave da estação, possibilitando o cálculo da vazão associada ao nível registrado que podem ser visualizadas na Figura 20 e Figura 21.

Figura 20 – Dados do evento de cheia em 18/10/2022

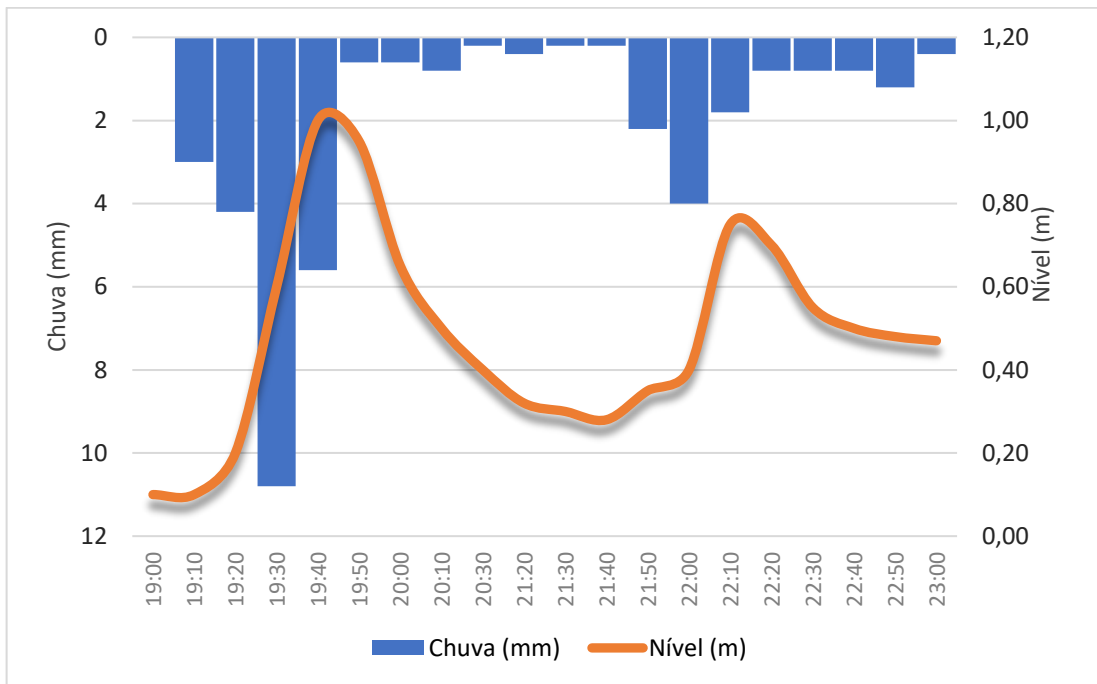
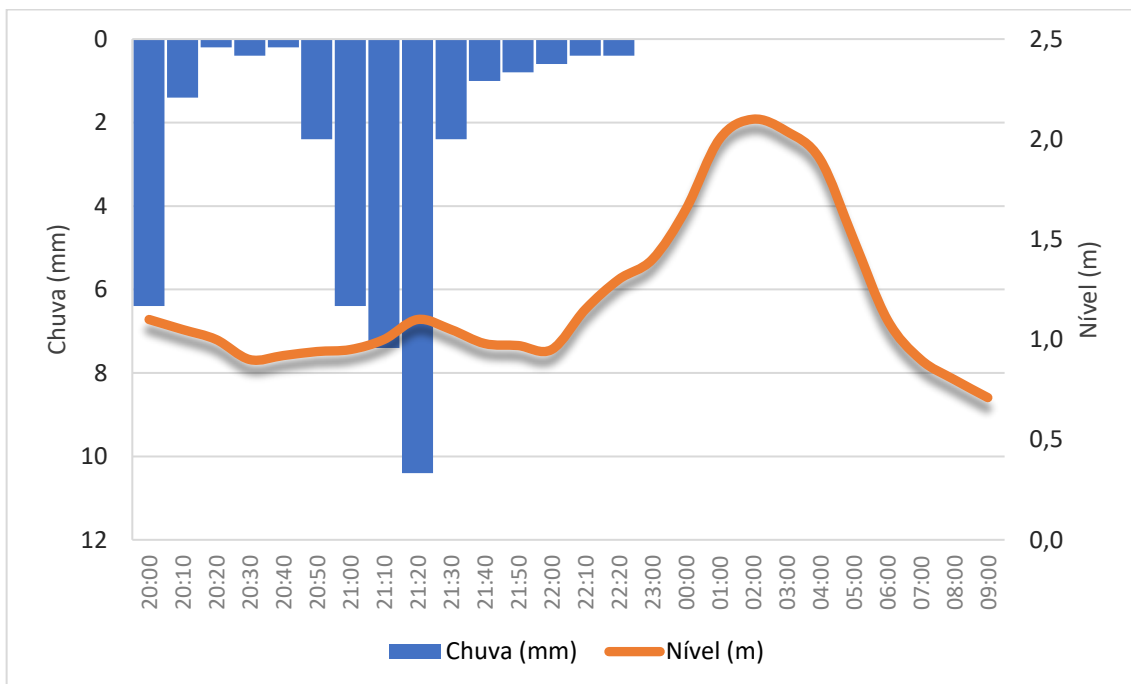


Figura 21 – Dados do evento de cheia em 23/01/2023.



Destaca-se que o evento de 18/10/2022 (Figura 20) registrou dois momentos de chuvas concentradas. O primeiro, ocorrido entre 19h10 e 20h30, totalizou 32,40 mm, seguido pelo segundo, a partir das 21h20, com 19,20 mm de chuva concentrada. Esse evento foi caracterizado pela resposta ágil da sub-bacia, evidenciando uma rápida elevação do nível logo após o início da precipitação, seguida por uma declinação igualmente rápida após o término da chuva. Importante notar a ausência de um terceiro incremento no nível ou uma elevação persistente em um período prolongado, sugerindo uma concentração da chuva na área urbanizada.

Além disso, ao analisar os dados pluviométricos obtidos na estação UNIFEI, juntamente com as informações das demais estações mencionadas no item 4.3.1, verificou-se que todas essas estações registraram ocorrência de chuvas. Nota-se, conforme apresentado na Tabela 19, que algumas dessas chuvas ocorreram em intervalos de tempo espaçados ao longo das horas.

Tabela 19 – Dados pluviométricos das estações no dia 23/01/2023.

	<b>UNIFEI</b>	<b>ESTIVA</b>	<b>São Vicente</b>		<b>Itajubá</b>
20:00	6,4	0,00	0,00	20:00	0
20:05	1,4	0,00	0,00	20:15	0
20:10	0,2	0,00	0,00	20:30	0
20:20	0,4	0,20	0	20:45	0
20:30	0,2	0,40	0,2	21:00	0
20:40	2,4	4,00	0,4	21:15	0
20:50	6,4	7,00	5,4	21:30	2,2
21:00	7,4	5,00	12,2	21:45	2,2
21:10	10,4	4,20	4,2	22:00	16,8
21:20	2,4	1,40	2,2	22:15	12,2
21:30	1	1,00	1,6	22:30	5,2
21:40	0,8	0,60	1,2	22:45	10,8
21:50	0,6	0,60	0,6	23:00	3
22:00	0,4	0,40	0,4	23:15	2,6
22:10	0,4	0,20	0,6	23:30	1,8
22:20	0,00	0,00	0,2	23:45	0,4
23:00	0,00	0,00	0,00	00:00	0,2
00:00	0,00	0,00	0,00	00:15	0
01:00	0,00	0,00	0,00	01:00	0
02:00	0,00	0,00	0,00	02:00	0
03:00	0,00	0,00	0,00	03:00	0
04:00	0,00	0,00	0,00	04:00	0
05:00	0,00	0,00	0,00	05:00	0
06:00	0,00	0,00	0,00	06:00	0
07:00	0,00	0,00	0,00	07:00	0
08:00	0,00	0,00	0,00	08:00	0

Através desta análise, é possível constatar que a ocorrência de chuva apresentou variações temporais entre as diferentes estações. Na estação UNIFEI, o evento teve início às 20h00 e encerrou-se às 22h10. Por outro lado, na estação Itajubá, localizada como a mais distante da estação de nível ASTHON/UNIFEI, a chuva teve início às 21h30 e término às 23h00, com um volume total superior ao registrado na estação UNIFEI, 57,4mm em comparação aos 40mm. Essa análise, somada ao fato de que o nível permaneceu acima da cota de transbordamento que é 1,5 metros por aproximadamente 04h30 minutos, sugere que, apesar das discrepâncias nos totais e nos horários de início e término da chuva, é possível que a precipitação tenha ocorrido em toda a extensão da BHRJP.

#### *5.2.1.2 Ajustando parâmetros no HEC-HMS*

Após análises preliminares da série de precipitação e do comportamento da vazão na BHRJP, observamos que o aumento do nível ocorreu imediatamente após a precipitação na bacia, sem um aumento nas horas subsequentes. Esse padrão na BHRJP sugere principalmente a ausência de precipitação nas sub-bacias a montante, caracterizando um evento localizado apenas na região mais urbanizada da bacia. Portanto, a decisão foi calibrar o modelo HEC-HMS, utilizando o evento de 18/10/2022 para ajustar especificamente as sub-bacias que estão localizadas na área urbanizada. Essa área engloba as sub-bacias da 11 a 19, conforme destacado na Figura 14.

No evento ocorrido em 23/01/2023, observou-se um comportamento distinto na vazão. O pico de nível ocorreu algumas horas após o término da precipitação na área urbanizada, mantendo-se acima da cota de 1,5m por aproximadamente 4 horas e 30 minutos. Em contraste com o evento anterior, notamos uma discrepância entre o comportamento da vazão e os registros de precipitação em horários e acumulados diferentes em estações próximas. Essa divergência auxilia na indicação de que a precipitação ocorreu de forma mais distribuída, com a influência de sub-bacias a montante sendo um fator significativo no evento. Portanto, vamos considerar a calibração realizada para sub-bacias na área urbanizada e posteriormente, realizar a calibração para sub-bacias a montante, considerando à BHRJP toda.

##### *5.2.1.2.1 Evento 18/10/2022*

Inicialmente alguns dados como CN e Lag Time das sub-bacias foram empregados no modelo podendo ser visualizados na Tabela 20.

Tabela 20 – Parâmetros iniciais da sub-bacia para calibração no evento 18/10/2022

<b>Sub-bacias</b>	<b>CN</b>	<b>Lag Time</b>
1	40	17,33
2	60	17,52
3	63	10,99
4	56	16,04
5	51	27,23
6	50	28,08
7	60	11,21
8	52	17,66
9	61	49,81
10	65	23,11
11	62	18,85
12	66	23,95
13	64	14,51
14	68	39,85
15	67	21,99
16	66	24,49
17	65	20,82
18	66	39,32
19	72	34,91

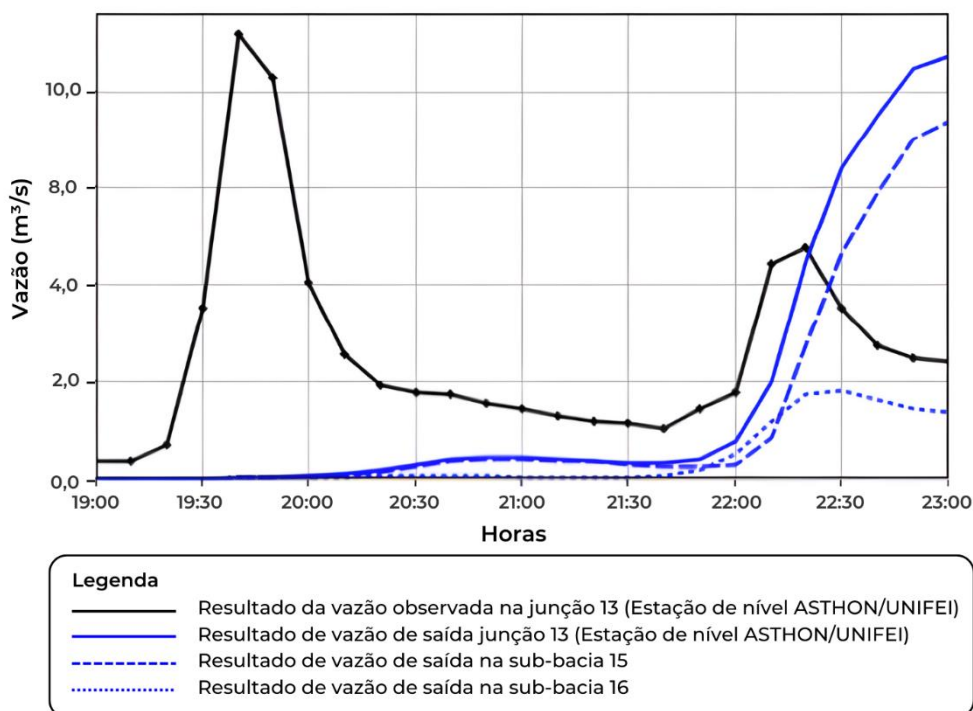
Além das informações iniciais sobre as sub-bacias, os dados referentes aos trechos de rios que conectam essas sub-bacias estão detalhados na Tabela 21. A numeração dos trechos de rios foi realizada pelo HEC-HMS, seguindo a ordem em que o trecho de rio 1 representa a localização mais a montante, enquanto o trecho de rio 15 está situado mais a jusante na BHRJP.

Tabela 21 – Parâmetros dos trechos de rio para calibração no evento 18/10/2022

<b>Trecho de rio</b>	<b>Coefficiente de Manning</b>	<b>Fluxo de base (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Largura do trecho de rio (m)</b>
1	0,035	0,1	1
2	0,035	0,1	1
3	0,035	0,1	1
4	0,035	0,1	1
5	0,035	0,1	1
6	0,035	0,1	2
7	0,035	0,1	2
8	0,035	0,3	2
9	0,035	0,3	2
10	0,035	0,3	2
11	0,035	0,3	2
12	0,035	0,3	2
13	0,035	0,3	3
14	0,035	0,3	4
15	0,035	0,3	4

O gráfico correspondente à resposta de vazões na junção 13 pode ser visualizado na Figura 22. Vale destacar que essa junção é crucial, uma vez que nela está localizada a estação de nível ASTHON/UNIFEI.

Figura 22 – Evento 18/10/2022 simulado no HEC-HMS com parâmetros iniciais.



Ao analisarmos o evento simulado do dia 18/10/2022 com os parâmetros iniciais, observamos um coeficiente de Nash de -0,17. Essa baixa pontuação evidencia a necessidade de ajustes no modelo para aprimorar a precisão da simulação nesse evento específico.

A partir dessa análise inicial, é possível identificar alguns parâmetros para ajustes visando a melhoria do coeficiente e da correspondência entre as vazões simuladas e observadas. Ao analisar o lag time, nota-se que no resultado do modelo o pico de vazão simulado ocorre algumas horas após o observado, indicando uma resposta mais lenta à precipitação. Isso sugere que o lag time preliminarmente adotado pode ser maior do que o ideal. Além disso, observa-se que o pico simulado é um pouco menor e mais espaçado do que o observado. Nesse contexto, uma possível calibração no CN pode ser realizada, uma vez que um pico simulado menor do que o observado com o CN inicial sugere uma subestimação na resposta hidrológica. Outro aspecto relevante é o coeficiente de Manning, que influencia a velocidade de escoamento. No gráfico, nota-se que o escoamento parece mais lento do que o observado, sugerindo um possível coeficiente de Manning superestimado. Com isso, foi ajustado os parâmetros CN, lag time e

coeficiente de Manning e fluxo de Base da seguinte maneira podendo ser visualizado na Tabela 22.

Tabela 22 – Parâmetros calibrados para o evento 18/10/2022

<b>Sub-bacias</b>	<b>CN</b>	<b>Lag Time</b>
<b>11</b>	49	10,69
<b>12</b>	53	13,38
<b>13</b>	51	8,36
<b>14</b>	54	21,56
<b>15</b>	54	12,35
<b>16</b>	53	13,66
<b>17</b>	52	11,73
<b>18</b>	53	21,29
<b>19</b>	58	19,05

Dentre as tentativas de calibração manual, a otimização mais eficaz considerando os parâmetros iniciais foi a redução do valor do CN em 20%. Quanto à calibração do *lag time*, foram conduzidos testes exploratórios utilizando as diferentes metodologias de Tc descritas na seção 5.1.3 deste trabalho. A análise indicou que o ajuste mais apropriado para o *lag time* foi obtido através do cálculo do Tc utilizando a metodologia proposta por Carter. Além disso, destaca-se que Silveira (2005) ressalta a aplicabilidade dessa fórmula, originalmente desenvolvida para representações em bacias urbanas, fortalecendo a escolha dessa abordagem na calibração.

Ao calibrar o coeficiente de Manning, identificou-se um ajuste mais apropriado por meio de uma redução progressiva, correlacionada à porcentagem de área urbanizada. A sub-bacia mais a montante, caracterizada por menor urbanização, exibiu um coeficiente de Manning mais elevado, enquanto a sub-bacia a jusante, mais urbanizada, apresentou um coeficiente menor. Essa relação evidencia a influência direta da urbanização na rugosidade do canal, resultando em variações no coeficiente de Manning, os dados calibrados podem ser vistos na Tabela 23.

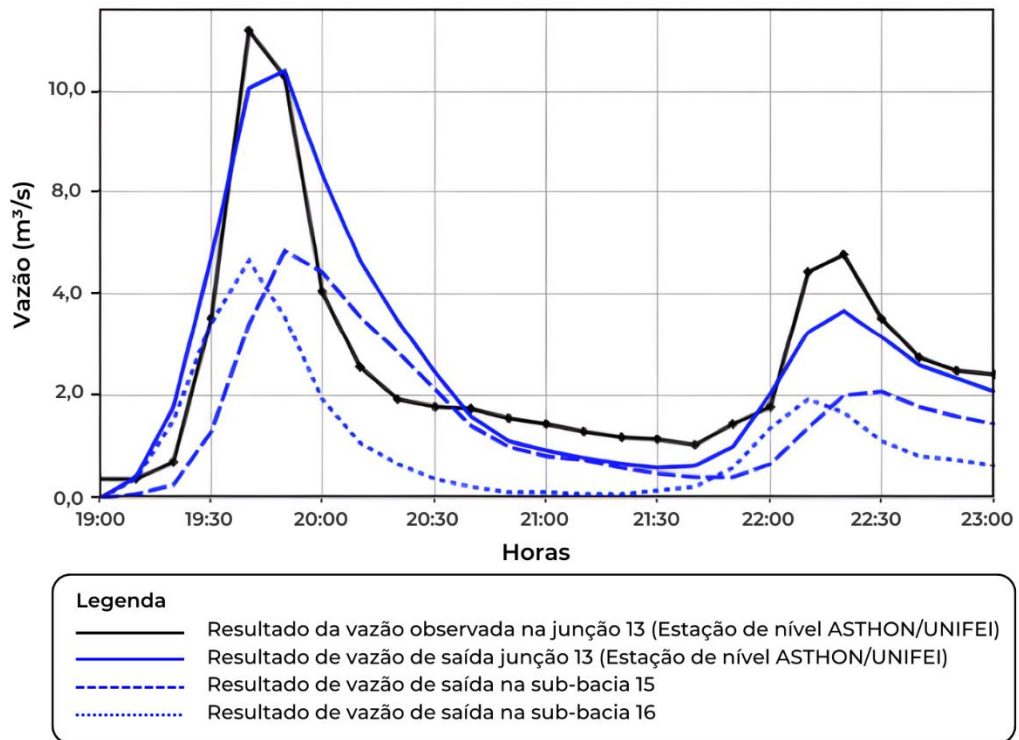


Tabela 23 – Parâmetros dos trechos de rio para calibração no evento 18/10/2022

Trecho de rio	Coefficiente de Manning	Fluxo de base (m <sup>3</sup> /s)	Largura do trecho de rio (m)
9	0,035	0,3	2
10	0,035	0,3	2
11	0,035	0,3	2
12	0,025	0,3	2
13	0,02	0,3	3
14	0,02	0,3	4
15	0,02	0,3	4

Após as devidas modificações e otimizações, procedeu-se com uma nova simulação, cujos resultados podem ser observados na Figura 23.

Figura 23 – Evento 18/10/2022 simulado no HEC-HMS com parâmetros calibrados.

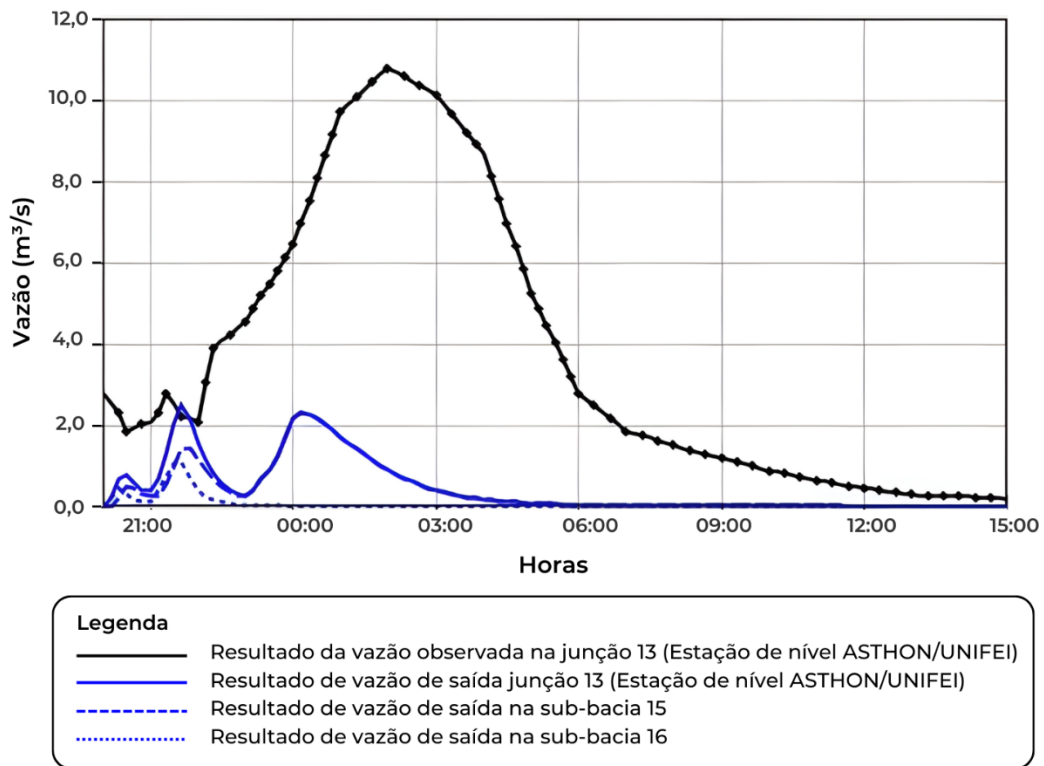


Após a calibração, o modelo apresentou graficamente picos de vazões e tempos de escoamento mais alinhados com os observados, resultando em um coeficiente de Nash de 0,81. Além disso, as somas totais de vazão aproximaram-se notavelmente. Antes da calibração, a vazão simulada foi de 10,6 m<sup>3</sup>/s, enquanto a observada foi de 16,5 m<sup>3</sup>/s. Após a calibração, esses valores foram ajustados para 16,6 m<sup>3</sup>/s na vazão simulada, evidenciando uma melhoria significativa na concordância entre os resultados simulados e observados.

### 5.2.1.2.2 Evento 23/01/2023

Semelhante ao evento de 18/10/2022, determinados parâmetros desempenharam papel crucial na simulação conduzida pelo HEC-HMS. Com base na calibração anterior do modelo para as sub-bacias urbanizadas, que resultou em um coeficiente de Nash favorável de 0,81, iniciou-se a modelagem empregando os mesmos parâmetros previamente ajustados para as sub-bacias localizadas na área urbanizada, os quais podem ser consultados nas Tabelas 22 e 23. Os resultados dessa simulação estão representados na Figura 24.

Figura 24 – Evento 23/01/2023 simulado no HEC-HMS com parâmetros calibrados para evento do dia 18/10/2022.



Ao analisarmos o evento simulado do dia 23/01/2023 com os parâmetros iniciais e parâmetros calibrados para as sub-bacias localizada nas áreas urbanizada, observamos um coeficiente de Nash de -0,09, indicando a necessidade de ajustes.

Da mesma forma que no evento anterior, determinados parâmetros foram passíveis de calibração para alcançar um ajuste mais eficaz. Ao analisar graficamente o desempenho no dia 23/01/2023, é notável uma significativa disparidade nos totais de vazão, com picos subestimados em comparação com as observações, além de uma recorrência consideravelmente mais rápida em relação ao que foi observado.

Dessa forma, iniciou-se o ajuste com redução de 18% no valor do CN, visando ampliar o pico de vazão. No que tange ao parâmetro de *lag time*, procurou-se identificar a resposta mais ágil da bacia, corrigindo a subestimação do tempo necessário para que a água alcance os pontos mais baixos da bacia, resultando, assim, no aumento desse parâmetro. A análise apontou que o ajuste mais apropriado para o *lag time* foi obtido por meio do cálculo do Tc utilizando a metodologia proposta por Pasini. Vale ressaltar que Silveira (2005) enfatiza a aplicabilidade dessa fórmula, originalmente desenvolvida para bacias rurais. Os parâmetros ajustados podem ser vistos na Tabela 24.

Tabela 24 – Parâmetros calibrados para o evento 23/10/2023

<b>Sub-bacias</b>	<b>CN</b>	<b>Lag Time</b>
<b>1</b>	33	35,16
<b>2</b>	49	36,02
<b>3</b>	46	16,47
<b>4</b>	52	33,03
<b>5</b>	42	59,17
<b>6</b>	41	62,22
<b>7</b>	43	20,54
<b>8</b>	49	41,66
<b>9</b>	53	114,55
<b>10</b>	51	39,66

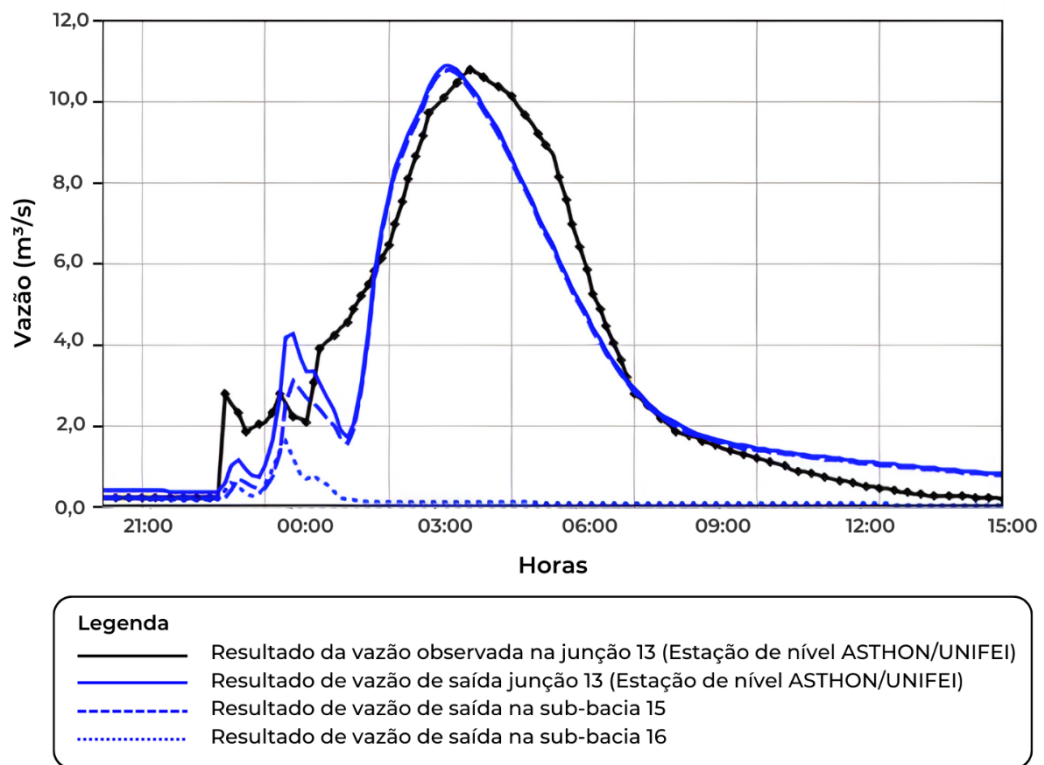
No decorrer do processo, constatou-se que a utilização exclusiva da série de precipitações da estação UNIFEI não reproduziria de maneira totalmente fidedigna o comportamento das vazões. Diante desse cenário, optou-se por realizar a média das precipitações das demais estações, considerando a escala horária correspondente, para obter uma nova série de precipitações. Vale ressaltar, entretanto, que mesmo com essa abordagem, representar com precisão a série de precipitações ainda é desafiador, uma vez que não há uma estação de monitoramento na parte mais alta da montante da bacia. Posteriormente, na calibração do coeficiente de Manning, observou-se uma necessidade de ajuste inverso em relação ao evento anterior. Foi preciso aumentar o coeficiente, variando-o de 0,035 a 0,08. Esse aumento está relacionado a áreas mais reflorestadas ou com maior cobertura vegetal, indicando uma redução na rugosidade do canal e, conseqüentemente, a necessidade de um coeficiente de Manning mais elevado para representar adequadamente a velocidade do escoamento, sendo descrito na Tabela 25.

Tabela 25 – Parâmetros dos trechos de rio para calibração no evento 23/01/2023

Trecho de rio	Coefficiente de Manning	Fluxo de base (m <sup>3</sup> /s)	Largura do trecho de rio (m)
1	0,080	0,1	1
2	0,080	0,1	1
3	0,080	0,1	1
4	0,080	0,1	1
5	0,080	0,1	1
6	0,080	0,1	2
7	0,075	0,1	2
8	0,050	0,3	2

A partir da calibração, que englobou os parâmetros das sub-bacias da área urbanizada e agora incorporou novos ajustes para sub-bacias de características rurais, alcançou-se um coeficiente de Nash favorável de 0,92. Este valor evidencia um ajuste eficaz do modelo. Os resultados dessa simulação estão apresentados na Figura 25.

Figura 25 – Evento 23/01/2023 com parâmetros calibrados no HEC-HMS.



Com as calibrações realizadas para os dois eventos, incluindo as sub-bacias da área urbanizada e sub-bacias localizadas à montante da área urbanizada, podemos concluir a calibração. Os parâmetros calibrados para todas as sub-bacias da BHRJP podem ser visualizados na Tabela 26 e Tabela 27, respectivamente.

Tabela 26 – Parâmetros calibrados de CN e lag time para a BHRJP

<b>Eventos calibrados</b>	<b>Sub-bacias</b>	<b>CN</b>	<b>Lag Time</b>	<b>Coefficiente de Nash</b>
<b>23/01/2023</b>	1	33	35,16	0,92
	2	49	36,02	
	3	46	16,47	
	4	52	33,03	
	5	42	59,17	
	6	41	62,22	
	7	43	20,54	
	8	49	41,66	
	9	53	114,55	
<b>18/10/2022</b>	10	51	39,66	0,81
	12	53	13,38	
	13	51	8,36	
	14	54	21,56	
	15	54	12,35	
	16	53	13,66	
	17	52	11,73	
	18	53	21,29	
	19	58	19,05	

Tabela 27 – Parâmetros calibrados de coeficiente de Manning, fluxo de base e largura de trecho de rio para a BHRJP

<b>Eventos calibrados</b>	<b>Trecho de rio</b>	<b>Coefficiente de Manning</b>	<b>Fluxo de base (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Largura do trecho de rio (m)</b>
<b>23/01/2023</b>	1	0,080	0,1	1
	2	0,080	0,1	1
	3	0,080	0,1	1
	4	0,080	0,1	1
	5	0,080	0,1	1
	6	0,080	0,1	2
	7	0,075	0,1	2
	8	0,050	0,3	2
<b>18/10/2022</b>	9	0,035	0,3	2
	10	0,035	0,3	2
	11	0,035	0,3	2
	12	0,025	0,3	2
	13	0,02	0,3	3
	14	0,02	0,3	4
	15	0,02	0,3	4

Com a calibração dos parâmetros nas sub-bacias, torna-se possível iniciar as simulações de forma mais precisa, proporcionando uma compreensão mais aprofundada do comportamento

hidrológico da BHRJP. Essa abordagem calibrada é fundamental para estabelecer um limiar crítico de inundação, permitindo uma análise mais confiável e detalhada das condições de risco associadas aos eventos hidrológicos na região.

### 5.2.2 Simulação dos eventos potencialmente deflagradores de inundação

Para a análise dos eventos de precipitação desencadeadores de inundações na BHRJP, uma série temporal de 10 anos proveniente de registros de 10 em 10 minutos da estação meteorológica da UNIFEI, abrangendo o período de agosto de 2013 a julho de 2023, foi utilizada. Ao analisarmos as chuvas diárias máximas anuais no município de Itajubá ao longo da série histórica compreendida entre 1941 e 2022 (Figura 14), observamos variações notáveis, registrando quantidades que oscilam entre 40mm e 140mm. Além disso, ao nos embasarmos nos resultados dos hietogramas de HUFF para períodos de retorno (TR) de 2, 10, 50 e 100 anos e procedermos à desagregação das chuvas para diferentes durações, constatamos que, para um TR de 2 anos com uma duração de 2 horas, a precipitação identificada foi de 37,6mm.

Para o mesmo TR, mas com duração de 3 horas, a quantidade aumenta para 42,3mm, e para uma duração de 6 horas, alcança 56,35mm. Esses valores crescem consideravelmente ao analisarmos um TR de 10 anos, com uma precipitação de 51,9mm para 2 horas, 58,40mm para 3 horas e 77,86mm para 6 horas. Com base nessa análise, estabelecemos a quantidade mínima de volume de chuva para a seleção dos eventos a serem simulados, fixando em 40mm registrados em uma duração de 24 horas. Dentre os registros, foram identificados e selecionados 52 eventos de precipitação.

Destes, dois eventos foram escolhidos para a etapa de calibração do modelo hidrológico HEC-HMS para a BHRJP, 18/10/2022 e 23/01/2023 respectivamente, considerando sua ocorrência simultânea de inundação e disponibilidade de dados detalhados de níveis registrados na estação fluviométrica BPS.

Dois eventos analisados foram excluídos das simulações, referentes aos meses de março de 2018 e março de 2023, devido à observação de precipitações diárias superiores a 300mm, além de registro máximo diário de 1330mm. Essas ocorrências atípicas foram consideradas duvidosas, com indício de superestimação na estação de medição. Dessa forma, optou-se por excluir estes dados das análises subsequentes.

Dos 50 eventos simulados no modelo HEC-HMS, 25 eventos indicaram a ocorrência de inundação atingindo a cota de 1,5 metros. A Tabela 28 detalha as datas e os totais de precipitação registrados durante esses eventos, fornecendo um registro da relação entre a ocorrência de chuvas e o episódio simulado de inundação na bacia de estudo.

Tabela 28 – Eventos registrados potencialmente causadores de inundação na BHRJP

<b>Data do Evento</b>	<b>Total de precipitação (mm)</b>	<b>Ocorrência de inundação</b>	<b>Duração</b>
29/11/2013	55,80	Ocorrência	1 hora
04/11/2013	52,40	Sem ocorrência	-
19/11/2014	54,20	Sem ocorrência	-
25/01/2015	75,60	Ocorrência	1 hora e 50 minutos
09/03/2015	56,40	Ocorrência	14 horas
08/09/2015	57,20	Sem ocorrência	-
15/12/2015	46,60	Ocorrência	2 horas
15/01/2016	67,60	Ocorrência	11 horas e 30 minutos
27/01/2016	52,40	Ocorrência	2 horas e 10 minutos
15/02/2016	47,60	Sem ocorrência	-
08/12/2016	57,20	Sem ocorrência	-
23/01/2017	54,20	Sem ocorrência	-
03/02/2017	63,20	Ocorrência	2 horas
27/02/2017	59,40	Ocorrência	3 horas e 50 minutos
04/03/2017	57,60	Sem ocorrência	-
19/05/2017	75,00	Ocorrência	12 horas e 40 minutos
29/09/2017	62,20	Sem ocorrência	-
10/11/2017	54,20	Ocorrência	11 horas
21/11/2017	51,20	Sem ocorrência	-
13/02/2018	56,00	Ocorrência	2 horas e 20 minutos
08/10/2018	65,20	Ocorrência	11 horas e 50 minutos
19/11/2018	44,60	Sem ocorrência	-
17/03/2019	40,00	Sem ocorrência	-
17/05/2019	41,80	Sem ocorrência	-
01/09/2019	53,20	Sem ocorrência	-
08/10/2019	63,80	Ocorrência	4 horas
27/11/2019	46,60	Sem ocorrência	-
10/02/2020	78,40	Ocorrência	19 horas e 50 minutos
06/12/2020	46,00	Sem ocorrência	-
12/12/2020	101,60	Ocorrência	10 horas e 50 minutos
26/12/2020	59,00	Sem ocorrência	-
03/01/2021	114,80	Ocorrência	1 hora e 30 minutos
07/01/2021	41,60	Sem ocorrência	-
21/01/2021	68,58	Ocorrência	20 minutos
31/01/2021	50,80	Sem ocorrência	-
05/02/2021	57,38	Sem ocorrência	-
06/03/2021	83,81	Ocorrência	17 horas
03/10/2021	54,31	Sem ocorrência	-
15/10/2021	43,18	Sem ocorrência	-
19/10/2021	50,27	Sem ocorrência	-

<b>Data do Evento</b>	<b>Total de precipitação (mm)</b>	<b>Ocorrência de inundação</b>	<b>Duração</b>
27/10/2021	130,23	Ocorrência	8 horas e 40 minutos
18/11/2021	65,87	Ocorrência	23 horas e 50 minutos
17/12/2021	43,20	Sem ocorrência	-
06/10/2022	45,00	Sem ocorrência	-
06/12/2022	58,32	Sem ocorrência	-
07/12/2022	42,09	Sem ocorrência	-
09/01/2023	129,78	Ocorrência	22 horas e 20 minutos
11/01/2023	68,58	Ocorrência	1 hora e 20 minutos
13/02/2023	40,00	Sem ocorrência	-
27/02/2023	59,40	Ocorrência	2 horas

A análise detalhada dos eventos de precipitação e sua relação com a ocorrência de inundação na bacia de estudo destaca uma variedade significativa de respostas hidrológicas. Notavelmente, 92% dos eventos com totais de precipitação inferiores a 50mm não apresentou indicação de inundação, com exceção do evento de 15/12/2015, registrado com 46,60mm, que resultou em inundação durante a simulação. Por outro lado, destaca-se a ausência de inundação em eventos com magnitudes superiores a 40mm, como o evento de 26/12/2020 que contabilizou 59mm. O mesmo acontece para o evento de 29/09/2017 que registrou 62,20mm, esses eventos não resultaram em inundação durante a simulação. Essa variabilidade na resposta hidrológica ressalta a complexidade da relação entre a quantidade de precipitação e a ocorrência de inundação, indicando a influência crucial de outros fatores como saturação do solo, condições anteriores de umidade e padrões específicos de distribuição temporal das chuvas.

Além disso, pode-se notar que todos os eventos de precipitação acima de 63mm, independentemente de outras variáveis, indicaram ocorrência de inundação nas simulações. Destacam-se, nesse contexto, eventos de maior magnitude como os registrados em 29/03/2018 (103,60mm), 12/12/2020 (101,60mm), 03/01/2021 (114,80mm), 27/10/2021 (130,23mm) e 09/01/2023 (129,78mm), todos demonstrando consistentemente a presença de inundação.

A análise temporal revelou uma distribuição sazonal significativa nos eventos de inundação simulados, predominantemente observados entre os meses de outubro a fevereiro. Essa tendência sazonal se alinha ao período da alta pluviosidade nessa região. Contudo, é importante notar que houve uma exceção marcante com o evento de 19/05/2017, o qual, apesar de registrar 75mm, contrasta com o padrão sazonal ao não ocorrer durante o período de pico de precipitação.

Quanto aos padrões horários, que serão vistos posteriormente, a maioria dos eventos de inundação ocorreram entre o final da tarde e a madrugada, um intervalo de tempo que



tradicionalmente concentra a maior atividade pluviométrica. No entanto, uma minoria de eventos, como os datados de 13/02/2018, 29/03/2018, 08/10/2019 e 03/01/2021, desviaram desse padrão, iniciando entre 12h00 e 15h00.

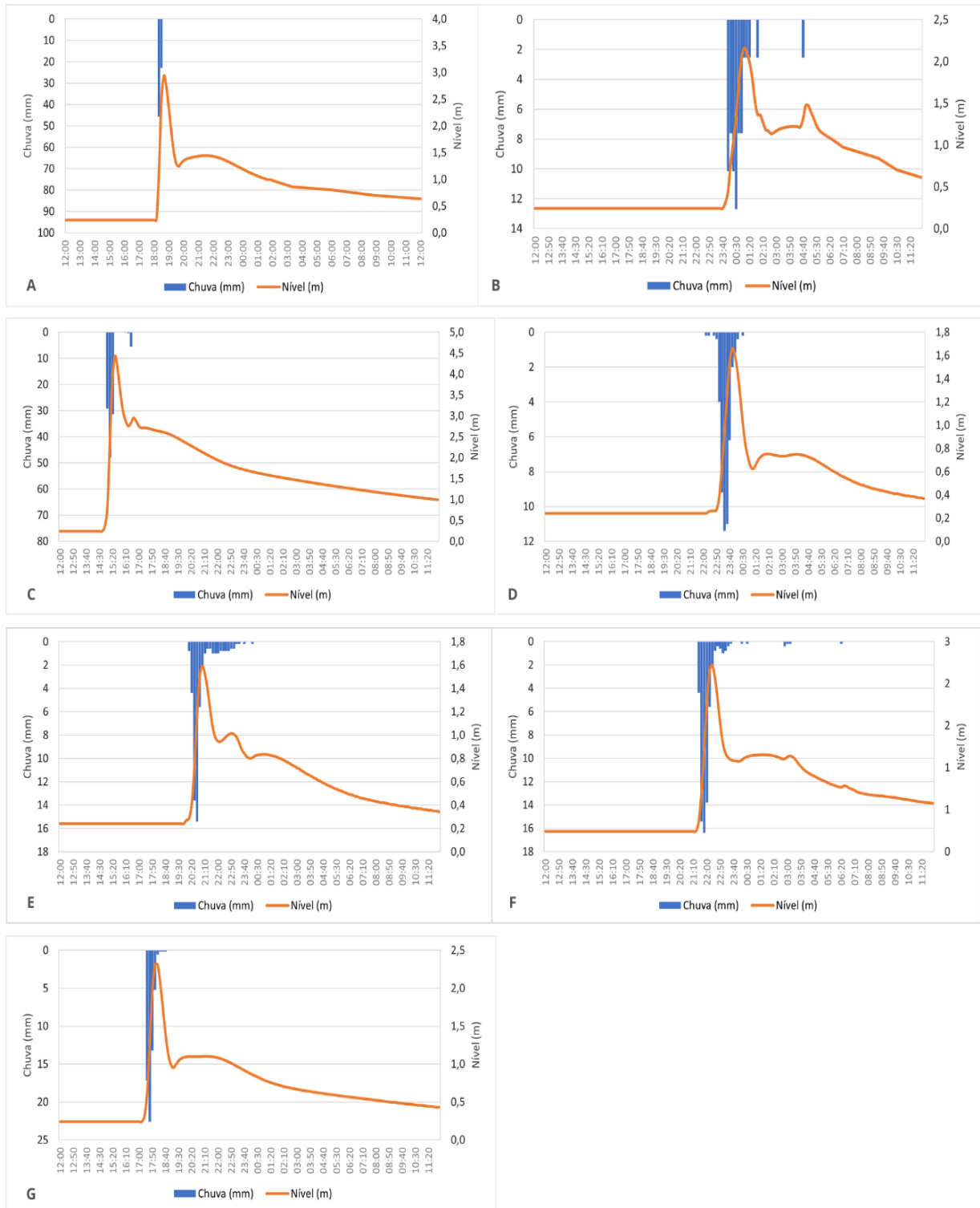
Neste contexto, selecionamos alguns eventos representativos para exemplificar o comportamento geral observado. Além do volume total de precipitação, a distribuição temporal das chuvas, o impacto nas bacias hidrográficas afetadas e os detalhes dos resultados das simulações de nível de água serão descritos. Para um entendimento mais amplo e detalhado, os dados completos desses eventos estarão disponíveis no anexo A.

Na análise dos eventos de inundação na BHRJP, uma observação relevante é a divisão entre dois tipos predominantes de chuvas que resultam em inundações. Em um primeiro momento temos eventos com chuvas concentradas e sem registro prévio de precipitação em um período igual ou inferior à soma de 24 horas. Por outro lado, encontramos eventos caracterizados por uma distribuição mais espaçada ao longo do dia ou que possuem registros de diferentes eventos de chuva dentro de um período de 24 horas que resultam em inundação.

#### *5.2.2.1 Simulação de eventos concentrados*

Nos eventos onde a chuva é concentrada em um curto período e não há registros de chuva anterior no período de 24 horas, observou-se uma incidência frequente de ocorrências de inundação, especificamente 11 eventos, sendo aqueles ocorridos nos dias 29/11/2013, 25/01/2015, 15/12/2015, 27/01/2016, 03/02/2017, 27/02/2017, 13/02/2018, 03/01/2021, 21/01/2021 e 11/01/2023 e 27/02/2023.

Figura 26 – (A) evento 21/01/2021, (B) evento 11/03/2023, (C) evento 03/01/2021, (D) evento 15/12/2015, (E) evento 27/01/2016, (F) evento 03/02/2017, (G) evento 27/02/2023.



O evento de 21/01/2021 (Figura 26A), apresentou um total de precipitação de 68,58mm em um pequeno intervalo de 20 minutos. Essa intensidade resultou em uma rápida resposta do ribeirão, atingindo a marca de 2,93m na simulação apenas 30 minutos após o início da chuva.

Em contraponto, o evento similar do dia 11/01/2023 (Figura 26B) registrou a mesma quantidade de precipitação, mas em um período maior, contabilizado durante 1 hora e 20 minutos ao qual resultou em um nível de 2,16m após 60 minutos do início da chuva. Esta comparação evidencia a influência da distribuição temporal da chuva na BHRJP, onde, apesar da equivalência nas quantidades de precipitação, a ocorrência mais prolongada da chuva resultou em um impacto menor no nível, devido ao seu intervalo temporal mais extenso. Destaca-se, igualmente, o evento histórico de 03/01/2021 (Figura 26C), caracterizado por uma chuva de 108,60mm em 30 minutos, resultando em um máximo de nível de aproximadamente 4,08m durante a simulação, representando a maior precipitação registrada em um intervalo tão curto ao longo da série histórica.

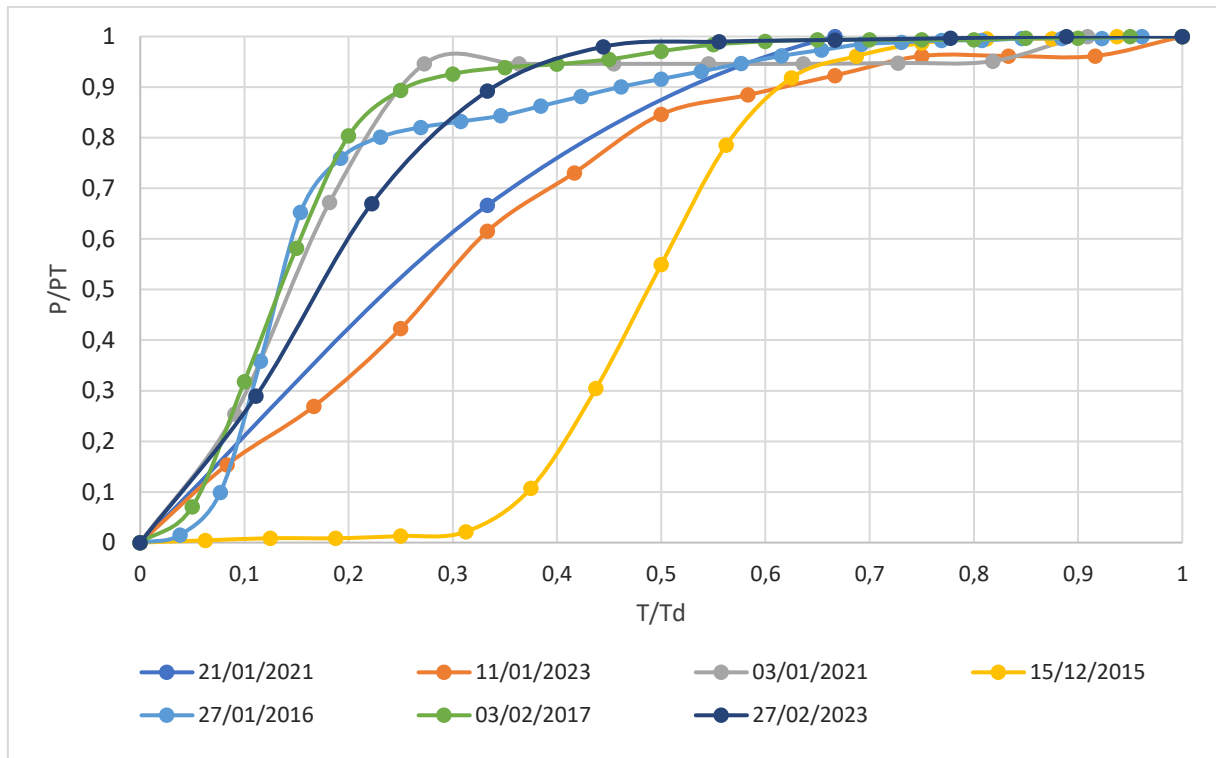
A distribuição temporal da chuva também demonstrou influenciar significativamente a resposta do ribeirão. Os eventos do dia 15/12/2015 (Figura 26D) e 27/01/2016 (Figura 26E), embora apresentassem quantidades de precipitação distintas, mas durações dos eventos relativamente próximos (46,60mm em 2 horas e 52,40mm em 2h10, respectivamente), registraram respostas diferentes na simulação. Enquanto o primeiro evento teve seu nível de 1,66m simulado após 1h40 minutos do início da chuva, o segundo evento, com tempo de precipitação similar, alcançou o nível de 1,59m em apenas 50 minutos durante a simulação.

Essa tendência de resposta diferenciada conforme a distribuição temporal também é observada nos eventos do dia 03/02/2017 (Figura 26F) e 27/02/2023 (Figura 26G). O primeiro apresentou 63,20mm em 2 horas, alcançando 2,22m após 50 minutos de chuva, enquanto o segundo, com total de precipitação semelhante (53mm em 30 minutos), registrou um aumento de nível para 2,31m após 40 minutos. A proximidade nos valores de precipitação, porém em intervalos distintos, revela a influência direta na velocidade de resposta do nível do ribeirão.

Em síntese, dentre todos os eventos simulados, destaca-se o evento de 21/01/2021 (Figura 26A) como o de resposta mais rápida, com uma precipitação concentrada em 20 minutos e uma resposta direta no aumento do nível em 30 minutos. Por outro lado, o evento mais distribuído em sua concentração temporal foi observado nos dias 15/12/2015 (Figura 26D) e 27/01/2016 (Figura 26E), com respostas simuladas entre 50 minutos até 1h40 após o início da chuva.

Ao realizar uma análise mais detalhada da distribuição temporal das chuvas concentradas, apresentaremos o gráfico adimensional da chuva acumulada, evidenciando os eventos mencionados (Figura 27). Observa-se que as chuvas concentradas estão localizadas entre o primeiro e segundo quartis de HUFF, sugerindo que a maior parte da precipitação ocorre durante os primeiros 25% a 50% da duração total do evento de chuva.

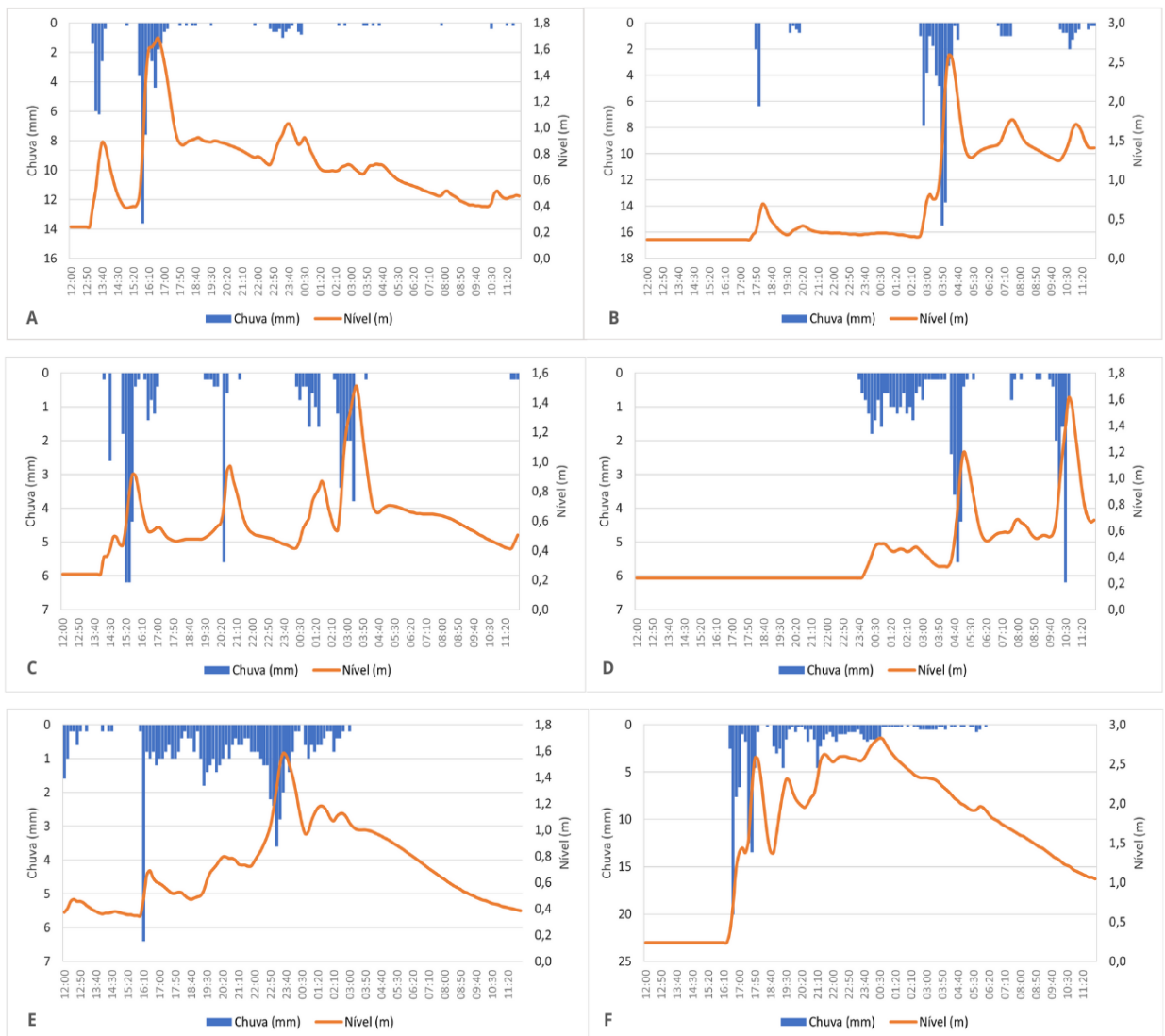
Figura 27 – Gráfico adimensional de chuva acumulada com distribuição temporal para eventos concentrados.



### 5.2.2.2 Simulação de eventos distribuído ao longo das 24 horas

Além da análise sobre os eventos concentrados, eventos que desencadeiam inundações revelou um padrão particular em doze casos distintos na BHRJP. Estes eventos se caracterizam por uma sequência de chuvas menores ao longo do tempo ou por chuvas concentradas após registros pluviométricos prévios, desempenhando um papel significativo no transbordamento do ribeirão. O comportamento do nível do Ribeirão para os eventos de 08/10/2019, 06/03/2021, 09/03/2015, 10/11/2017, 15/01/2016 e 27/10/2021 podem ser visualizados na Figura 28.

Figura 28 – (A) evento 08/10/2019, (B) evento 06/03/2021, (C) evento 09/03/2015, (D) evento 10/11/2017, (E) evento 15/01/2016 (F) evento 27/10/2021



Observou-se que, em situações como a do dia 08/10/2019 (Figura 28A), uma chuva total de 54,80mm, distribuída em 4 horas, teve 38mm dessa precipitação concentrada em apenas 1h30min, resultando em um nível de 1,68m na simulação. Similarmente, no dia 06/03/2021 (Figura 28B), um evento de 83,81mm, sendo 61,21mm em apenas 2 horas, gerou um registro de nível de 2,58m. Esses eventos destacam a influência crucial da concentração temporal da chuva, onde parcelas significativas em períodos curtos impactam diretamente nos níveis do ribeirão.

Além disso, houve casos, como o do dia 09/03/2015 (Figura 28C), onde um total de 56,40mm ao longo de 14 horas foi dividido em três chuvas concentradas. Na terceira delas, 15mm em 60 minutos foram suficientes para atingir o nível de 1,51m. Similarmente, no dia 10/11/2017 (Figura 28D), uma chuva de 54,20mm em 11 horas, com 14,60mm em 60 minutos, resultou em um nível de 1,61m.

Além disso, também foram observados eventos com uma distribuição mais equilibrada da precipitação ao longo do tempo, como registrado no dia 15/01/2016 (Figura 28E), totalizando 67,60mm de precipitação distribuídos ao longo de um período mais extenso. Nesse evento, aproximadamente 57mm foram registrados em um intervalo de 11 horas e 30 minutos. O comportamento dos níveis foi marcado por um aumento gradual, atingindo 1,59m dentro desse período.

Esses padrões levantam considerações sobre as interações do solo e seu papel na ocorrência de inundações. A chuva prévia, mesmo que de menor intensidade, pode contribuir para a saturação do solo. A chuva prévia, mesmo de menor intensidade, pode saturar o solo. Em eventos subsequentes, mesmo com menor quantidade total de chuva, o solo saturado reduz a infiltração, aumentando o escoamento superficial e potencializando a inundação.

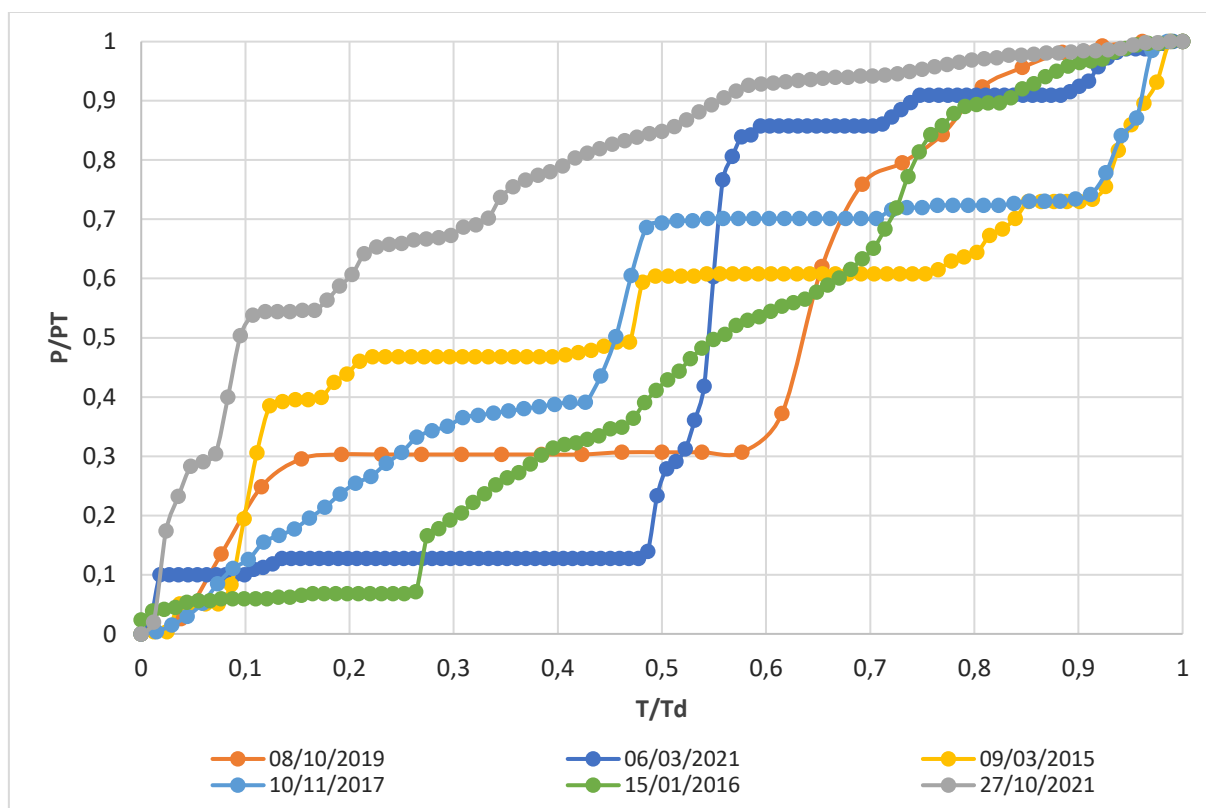
Durante inundações, notou-se uma relação entre a interferência das bacias a montante e as variações nos níveis do ribeirão. Após a chuva na área urbanizada, ocorreu uma tendência à redução nos níveis, representando a porção mais a jusante da bacia. No entanto, em um intervalo posterior, após atingirem níveis inferiores a 1,5 metros, observou-se aumento influenciado pela vazão das bacias a montante, podendo estender-se por até 4 horas e 30 minutos após o término da chuva.

Em resumo, ao observar eventos de chuvas concentradas, destaca-se um padrão consistente. A maioria dos eventos desencadeadores de inundações ocorre com 34,60 a 50 mm de precipitação concentrada em 20 minutos a 1 hora e 20 minutos. Este intervalo é crítico, ultrapassando o nível de 1,5m do Ribeirão. Volumes mais elevados em tempos menores resultam em transbordamento e inundação, exemplificados nos eventos dos dias 03/01/2021 (Figura 26C) e 21/01/2021 (Figura 26A), ilustram essa tendência. Nessas datas, houve uma quantidade significativamente maior de precipitação, o primeiro evento com um acumulado de 108,60mm concentrado em 30 minutos e o segundo evento com precipitação total de 68,58mm em 20 minutos. Isso evidencia que, quando a quantidade de precipitação supera consideravelmente o limiar crítico, mesmo em um espaço de tempo tão reduzido, a resposta é imediata, desencadeando inundação.

Outro exemplo é o evento do dia 27/10/2021 (Figura 28F), com um total de 130,23 mm, concentrando cerca de 70,87 mm em apenas 1 hora e 30 minutos, ilustram como volumes mais expressivos em intervalos curtos resultam em respostas rápidas do curso d'água, levando ao transbordamento em um curto período.

Assim como nos eventos concentrados, conduziu-se uma análise adimensional da chuva acumulada nos eventos distribuídos para compreender a distribuição temporal das chuvas, apresentada na Figura 29. Nota-se que as chuvas distribuídas se localizam entre o primeiro e o segundo quartil HUFF, indicando que a maior parte da precipitação ocorre aproximadamente durante 50% da duração total do evento de chuva.

Figura 29 – Gráfico adimensional de chuva acumulada com distribuição temporal para eventos distribuídos.

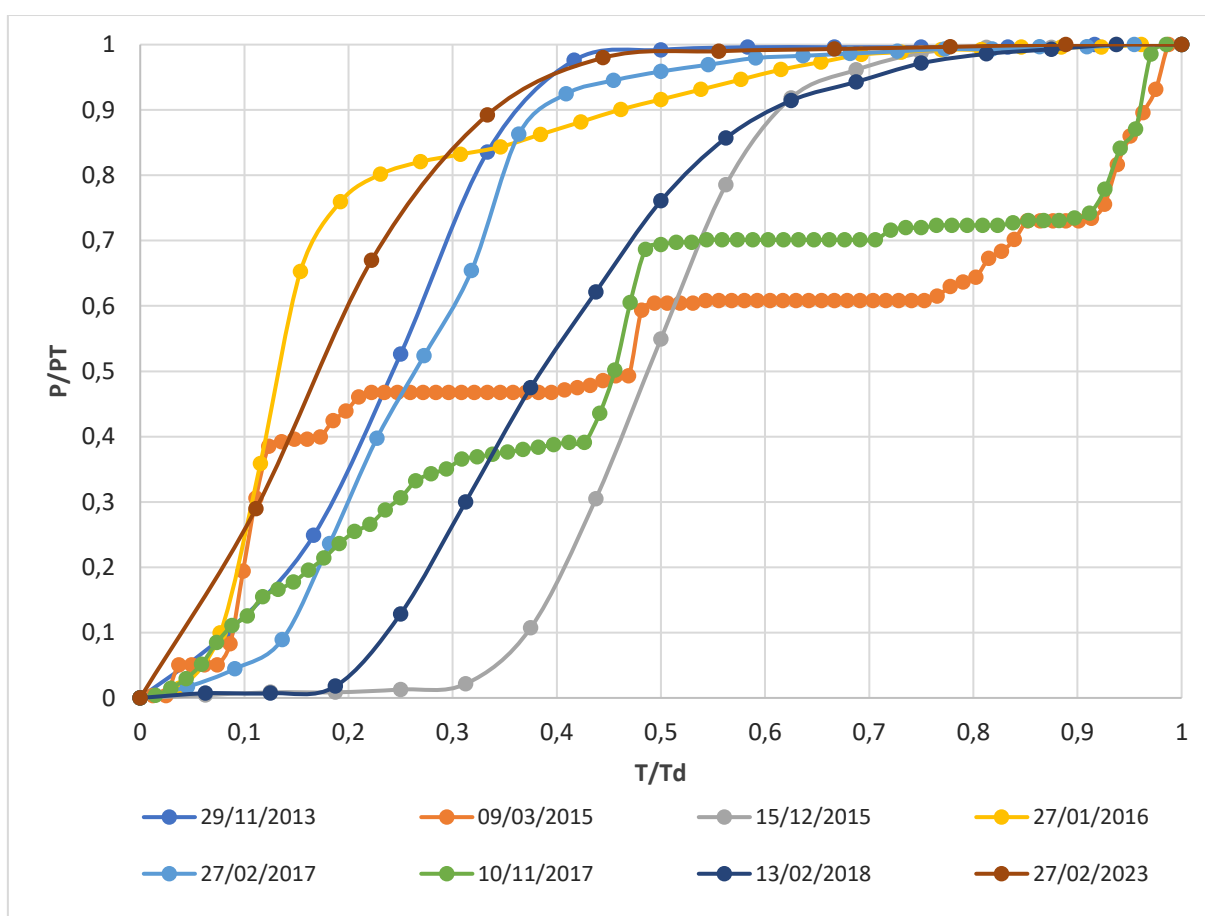


Na análise dos eventos, juntamente com gráficos adimensionais de precipitação acumulada, observa-se que a precipitação significativa ocorre majoritariamente entre 25% e 50% da duração total das chuvas desencadeadoras de transbordamento ou inundação, conforme metodologia de Huff (1967). Essa abordagem revela que as chuvas potencialmente propensas a causar inundação têm uma probabilidade mais significativa de ocorrer entre os 25% e 50% do tempo total.

Os eventos de precipitação variando de 46,60 mm a 63,00 mm em um período de 24 horas, alguns resultaram em inundação, enquanto outros não. Uma análise detalhada revela que os eventos com indicativos de inundação possuíam, em geral, uma distribuição de chuva mais concentrada. Alguns eventos que resultaram em transbordamento e subsequente inundação iniciaram com uma chuva mais leve no início do período, seguida por uma chuva mais intensa e concentrada, desencadeando a inundação. Por outro lado, eventos com a mesma quantidade

total de chuva, mas distribuídos em intervalos mais espaçados ao longo do dia ou ao longo de horas, não causaram inundação. Para uma visualização mais clara desses padrões, os eventos de chuva dentro desta faixa de 46,60 mm a 63,00 mm no período de 24 horas, que apresentaram indicativos de inundação, podem visualizados no gráfico adimensional de precipitação acumulada, conforme representado na Figura 30.

Figura 30 – Análise adimensional de distribuição temporal de chuvas na faixa de 46,60mm à 63mm em 24 horas que indicaram inundação.

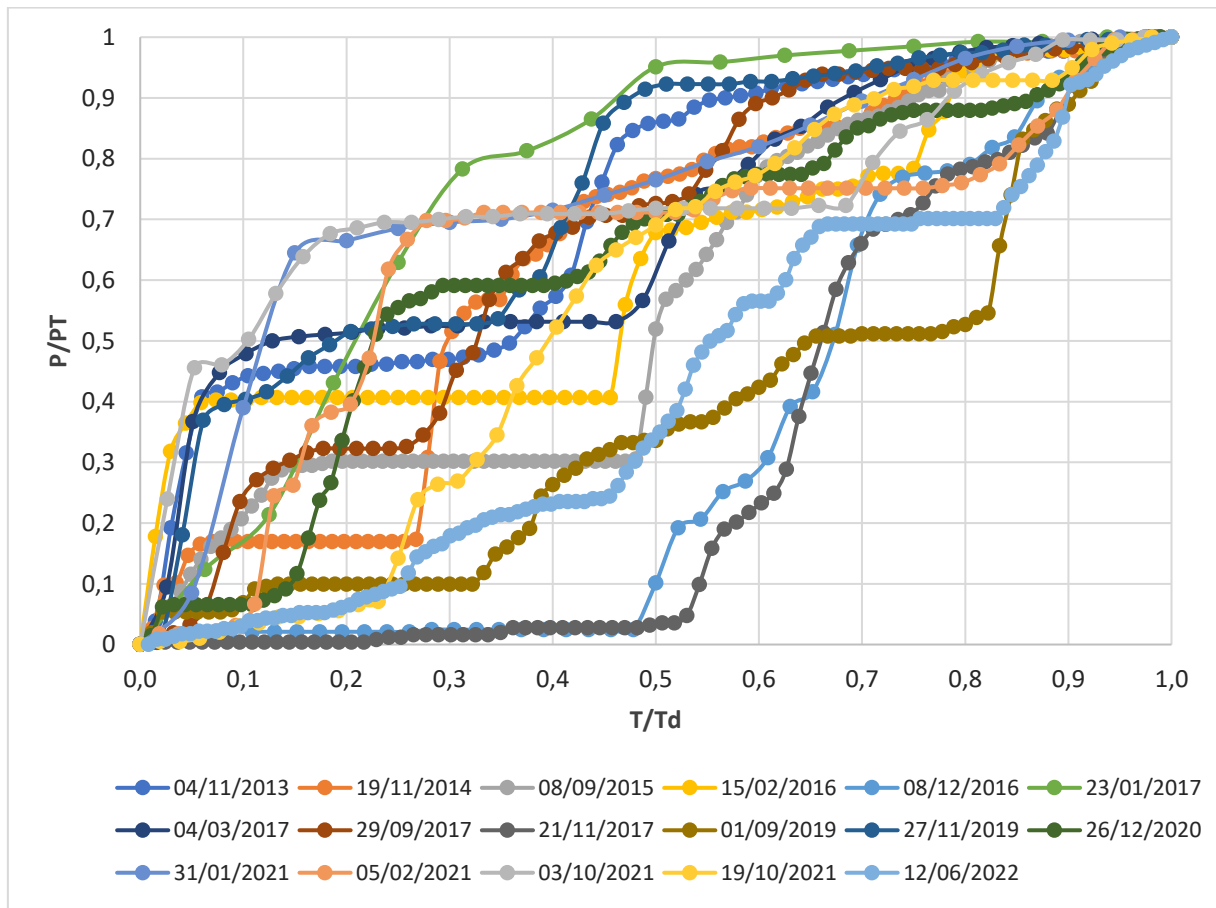


Os eventos sem ocorrência de inundação, mesmo acumulando quantidades similares de precipitação, não apresentaram as maiores concentrações pluviométricas em períodos curtos, como por exemplo, eventos como os dias 04/11/2013, 19/11/2014, 08/09/2015, 15/02/2016, 08/12/2016, 23/02/2017, 04/03/2017, 29/09/2017, 21/11/2017, 01/09/2019, 26/12/2020, 31/01/2021, 05/02/2021, 03/02/2021, 19/10/2021 e 06/12/2022. Apesar de acumularem quantidades similares de chuva, esses eventos mantiveram uma distribuição mais uniforme e gradativa ao longo das 24 horas. Essa característica possibilitou que a bacia hidrográfica absorvesse a água de forma gradual, evitando sobrecargas súbitas no sistema de drenagem. Para uma visualização mais aprofundada desses padrões e como a distribuição uniforme influencia



a resposta hidrológica, as chuvas de 46,60 mm a 63,00 mm, que não apresentaram indicativos de inundação, podem ser exploradas no gráfico adimensional de precipitação acumulada, conforme representado na Figura 31.

Figura 31 – Análise adimensional de distribuição temporal de chuvas na faixa de 46,60mm à 63mm em 24 horas que não indicaram inundação.



Já os eventos que se aproximaram de causar inundação tinham somas e distribuições semelhantes aos que indicaram transbordamento do ribeirão, com um formato de chuva mais distribuída ao longo do dia. Por exemplo, eventos como o dia 29/09/2017 (Figura 32) com 62,20 mm de precipitação e concentração de 57 mm em 7 horas elevando o nível à 1,48m, muito próximo ao nível de transbordamento ou o evento de 03/10/2021 (Figura 33) com 54,31 mm distribuídos em 7 horas que demonstrou um aumento do nível em 1,39m durante as simulações, tiveram níveis de água elevados, chegando próximo ao limite de transbordamento, mas não alcançaram a inundação devido à distribuição mais espaçada da chuva ao longo do tempo.

Figura 32 – Evento 29/02/2017.

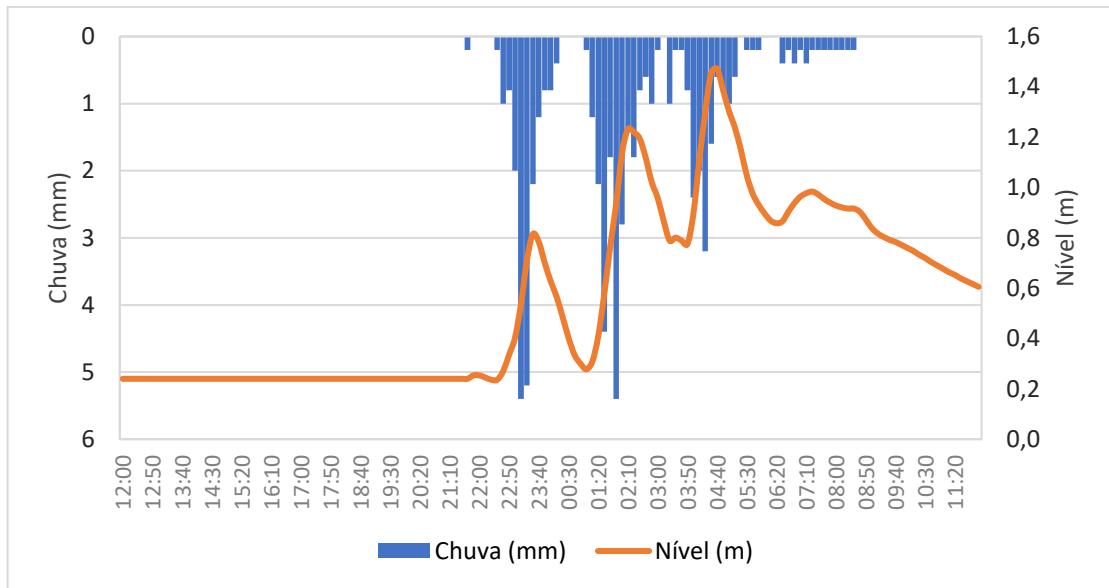
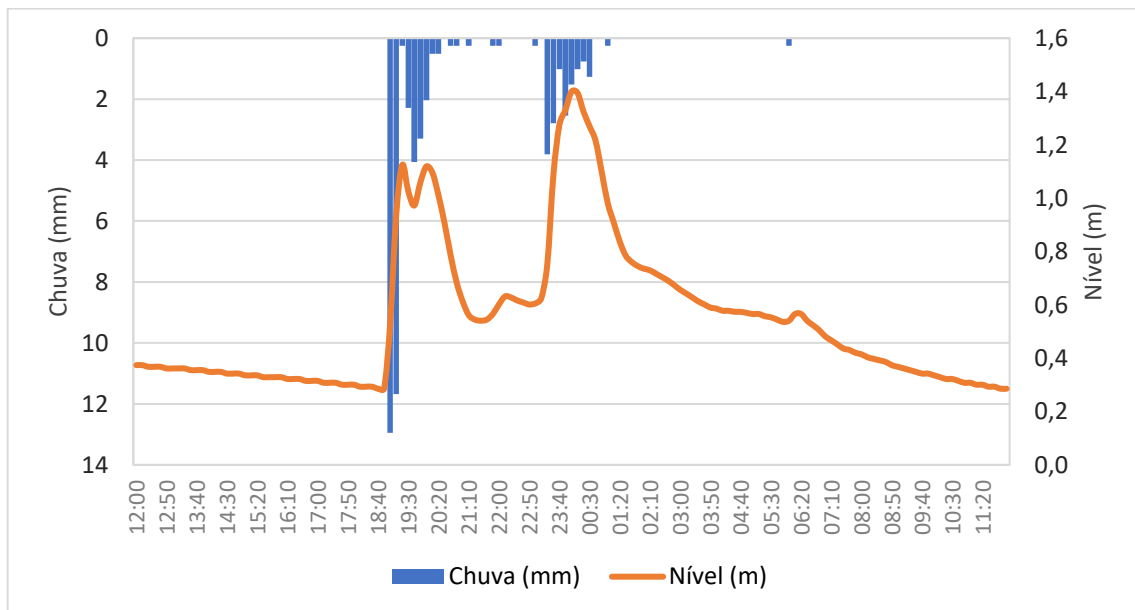


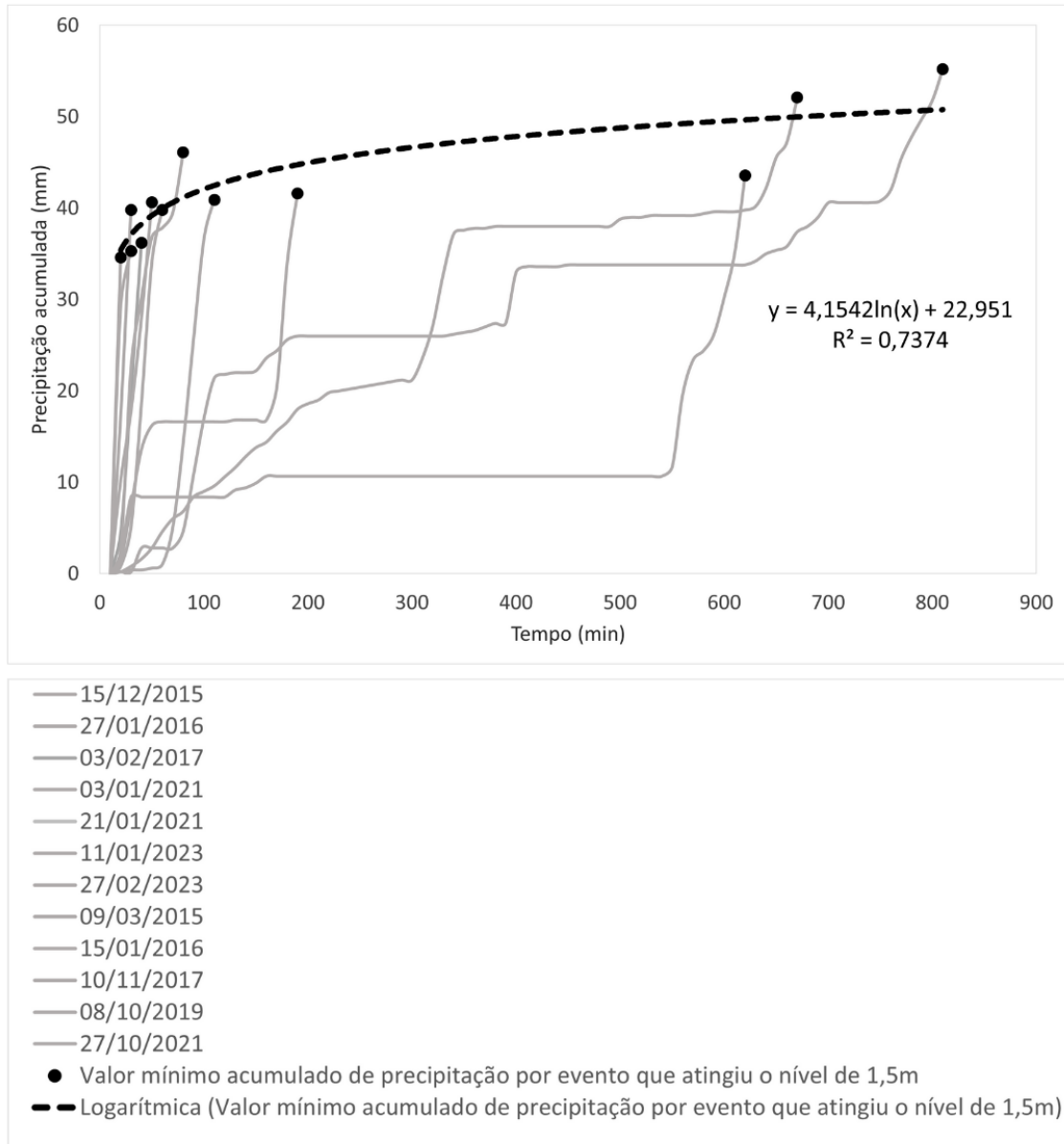
Figura 33 – Evento 03/10/2021.



Durante essas simulações, determinamos o volume mínimo acumulado de precipitação capaz de gerar um nível crítico na seção de estudo. Isso foi realizado ao diminuir uma parcela da chuva total de cada evento e verificar qual era o volume mínimo necessário para atingir a cota do nível. Dentre todos os eventos mencionados, aquele ocorrido em 21/01/2021 (Figura 26A) se destacou ao apresentar um total de precipitação de 68,58mm em um curto intervalo de 20 minutos, identificado como o de mais rápida ocorrência, com o menor acumulado de chuva necessário para o transbordamento da cota do nível, sendo 34,60mm em 10 minutos. Eventos como o de 27/02/2023 (Figura 26G), que somaram 53mm em 30 minutos, também merecem destaque, onde 39,80mm em 20 minutos foram suficientes para provocar o transbordamento do

Ribeirão. O valor mínimo de precipitação acumulada ao longo do tempo necessário para atingir o nível de 1,5m na seção transversal de estudo da BHRJP pode ser visualizado na Figura 34.

Figura 34 – Gráfico de limiares de precipitação desencadeadoras de inundação na BHRJP.



Com o limiar calculado para a seção transversal específica, representado pela linha tracejada na Figura 34, este pode ser integrado às operações de previsão em tempo real, utilizando dados observados ou registros de pluviômetros em tempo real. Dependendo do nível de risco associado a esse limiar, alertas podem ser acionados, sendo direcionados a entidades como a Defesa Civil.

Portanto, com as presentes informações, consegue-se realizar uma compreensão mais detalhada sobre a hidrodinâmica na BHRJP, destacando limiares críticos de chuva e padrões de

resposta específicos em sub-bacias. A implementação desses limiares em sistemas de alerta emergencial, junto com a análise de eventos, oferece ferramentas práticas para a gestão de riscos e proteção de comunidades. A investigação detalhada das sub-bacias ressalta a complexidade das interações naturais e antropogênicas, crucial para o planejamento urbano e a sustentabilidade hídrica. Ao integrar esses resultados em estratégias adaptativas, os resultados demonstrados não apenas contribuem para o conhecimento acadêmico, mas também para decisões fundamentadas em um cenário de mudanças climáticas e expansão urbana.

## 6 CONCLUSÕES

A bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira enfrenta um aumento expressivo na incidência de inundações, especialmente durante chuvas intensas, devido à sua topografia montanhosa, com a área urbanizada situada a jusante. Durante o período chuvoso de outubro a março, a precipitação média mensal varia entre 180-240 mm, contrastando com os meses secos de abril a setembro, com médias de 50 mm. Essa combinação de fatores resulta em respostas rápidas da bacia às precipitações, causando desafios na gestão eficaz dos recursos hídricos.

Na calibração do modelo HEC-HMS dois eventos de inundação onde foram utilizados com base nos registros históricos pluviométrico e de nível. Nesse momento, ajustes em fatores como CN, *lag time* e  $T_c$  foram necessários para simulações mais precisas. Reduziu-se o CN em 20% para sub-bacias urbanas e 18% para as rurais a montante. *Lag time* e  $T_c$  diminuíram com metodologias mais adequadas. Carter foi preferível para sub-bacias urbanas, enquanto Pasini mostrou melhor aplicabilidade nas rurais.

Além disso, os eventos selecionados para posterior simulação foram selecionados com base em registros pluviométricos de 2013 a 2023. Destacou-se o evento de 21/01/2021 como o de resposta mais rápida, com precipitação concentrada de 68,58mm em 20 minutos, sendo 34,60mm em apenas 10 minutos. A influência das bacias a montante na variação dos níveis do ribeirão durante eventos de inundação foi evidente, persistindo por até 4 horas e 30 minutos após o término da chuva na área urbanizada.

Durante a análise dos eventos, a tendência consistente é que a maior parte da precipitação significativa ocorre entre os primeiros 25% e 50% da duração total das chuvas desencadeadoras de transbordamento ou inundação. Essa observação contribui para uma compreensão mais aprofundada dos padrões temporais e intensidades críticas dos eventos hidrológicos na bacia hidrográfica.

Com a calibração do modelo HEC-HMS e a simulação dos eventos selecionados na BHRJP, foi possível aprimorar o entendimento do acumulado total de chuva e sua distribuição. Identificou-se, em todos os eventos, o valor mínimo acumulado de chuva, independentemente do tempo total, necessário para que o Ribeirão José Pereira ultrapasse a cota de 1,5m. Esses valores foram representados por uma curva logarítmica, indicando que, ao iniciar a chuva e, ao decorrer do tempo, o acumulado ultrapassar a curva ou atingir o valor de 34,60mm, deve-se emitir um alerta, sinalizando a possibilidade iminente de o Ribeirão José Pereira ultrapassar a cota.

A análise aprofundada da BHRJP destaca a complexidade dos fatores que causam eventos de inundação. A interação entre a topografia montanhosa, a urbanização desordenada e variáveis hidrológicas exige uma abordagem integrada para a gestão eficiente dos recursos hídricos na região. Simulações e ajustes nos parâmetros hidrológicos proporcionam informações cruciais, permitindo uma compreensão mais precisa dos padrões de resposta da bacia a diferentes condições climáticas. A identificação de sub-bacias críticas e a observação dos limiares de precipitação que desencadeiam inundações contribuem para o desenvolvimento de estratégias preventivas e de mitigação.

Diante dos desafios enfrentados, a pesquisa propõe recomendações para trabalhos futuros que possam contribuir para um conhecimento mais detalhado das interações que ocorrem na BHRJP. A primeira delas consiste em realizar o cálculo do inverso da distância entre estações meteorológicas para estimar a quantidade de chuva em uma estação que não possui dados, podendo estar relacionado a técnicas de interpolação espacial em meteorologia. Além disso, recomenda-se a incorporação de dados detalhados sobre a evaporação da região, a fim de entender melhor a interação entre os processos de precipitação e evaporação. Por fim, uma análise mais aprofundada da saturação do solo durante eventos de chuva seria valiosa para avaliar adequadamente a influência do solo nas inundações.

Considerando todas as recomendações mencionadas, sugere-se a implementação dessas metodologias em uma API (Interface de Programação de Aplicações) dedicada. Uma API meteorológica personalizada poderia oferecer uma plataforma centralizada para acesso e utilização eficiente dos dados calculados, como o inverso da distância entre estações meteorológicas, informações detalhadas sobre a evaporação da região e análises da saturação do solo durante eventos de chuva. Uma API bem projetada facilitaria o compartilhamento desses dados com pesquisadores e tomadores de decisão, promovendo a integração fácil em várias aplicações e sistemas.

Além disso, ressalta-se a necessidade contínua de monitoramento, planejamento e intervenções específicas para enfrentar mudanças climáticas e a pressão antropogênica na bacia hidrográfica. Essas análises não só contribuem para a compreensão profunda da dinâmica hídrica local, mas também estabelecem uma base sólida para a implementação de medidas sustentáveis e adaptativas, visando a preservação do equilíbrio ambiental e a proteção das comunidades afetadas.

## REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, M. T.; SATYAM, N.; PRADHAN, B. The selection of rain gauges and precipitation parameters in estimating intensity-duration limits for landslide occurrence: case study of Wayanad (India). **Water**, v. 12, no. 4, p. 1000, 2020.
- ABREU, Fernando Girardi de; SOBRINHA, Lôide Angelini; BRANDÃO, João Luiz Boccia. **Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 22, p. 239-250, 2017.
- ADLER, R. F., HUFFMAN, G. J., CHANG, A., FERRARO, R., XIE, P. P., JANOWIAK, J., CURTIS, S. The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979–Present). **Journal of Hydrometeorology**, v. 1, n. 1, p. 35-50, 2000.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023: Informe anual / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília. ANA, 118p. 2024.
- ALI, R.; HUSSEIN, H. M.; TARIQ, S. Assessment of flood hazard zones using remote sensing and GIS techniques: A case study of River Chenab, Pakistan. **Journal of Water and Land Development**, v. 38, n. 1, p. 5-16, 2018.
- ALVALÁ, R. C. S.; BARBIERI, A. F. Desastres naturais. **Mudanças climáticas em rede: um olhar interdisciplinar**. São José dos Campos, SP: Inpe, v. 1, p. 203-230, 2017.
- ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, M. T. Análise morfométrica da bacia hidrográfica riacho Namorado, São João do Cariri-PB: uma ferramenta ao diagnóstico físico. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 31, n. 3, 2014.
- BACELAR, L. C. S. D.; MACIEL, A.; ANGELIS, C. F.; TOMASELLA, J. Limiares de chuva deflagradores de inundações bruscas: metodologia, aplicação e avaliação em ambiente operacional. **Revista DAE**, v. 68, p. 71-86, 2020.
- BACK, A.J., 2018. **Análise de frequência de vazões máximas para projetos de drenagem**. Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil Unesc, 1(2), 1–14.
- BAPTISTA, M. B. NASCIMENTO, N. O. BARRAUD, S. Técnicas compensatórias em drenagem urbana. **Porto Alegre: ABRH**, 2005.
- BATES, P. D. et al. Characteristics of flash floods in Europe and their implications for flood risk management. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 302-313, 2015.
- BATISTA, M. de J.; NOVAES, F. de; SANTOS, D. G. dos. **Drenagem como instrumento de dessalinização e prevenção da salinização de solos**. 2ª ed., rev. e ampliada. Brasília: CODEVASF, 2002 216 p. il. (Série Informes Técnicos). Disponível em: Acesso em: 08 nov. 2023.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. (1993) Precipitação, In: TUCCI, C. E. M. (org.), **Hidrologia: Ciência e Aplicação**, Editora da Universidade, Porto Alegre, p. 177-241.
- BHERING, G. T. A. et al. Flood hazard and risk mapping using GIS and remote sensing: A case study in São Paulo, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 3, p. 114, 2018.

BLÖSCHL, G. Rainfall-runoff modeling of ungauged catchments. In: **Encyclopedia of Hydrological Sciences**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2005. p. 19.

BORGA, M. ANAGNOSTOU, E. N., BLOSHL, G. CREUTIN, J.D. Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project. **Environmental Science & Policy**, v. 14, n. 7, p. 834-844, 2011.

CANHOLI, A.P. (2005) Drenagem urbana e controle de enchentes. São Paulo: Oficina de Textos. 302 p

CARVALHO, L. M. T. et al. Ferramentas computacionais para modelagem hidrológica: revisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 6, p. 533-548, 2016.

CATALINHA, M. J.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G.; SOARES, C. P. B. RIBEIRO, A. Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.1, p.153-162, 2002.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Drenagem urbana: manual de projeto. 1.ed. **São Paulo: DAEE/CETESB**, 1986. 466p.

CIRINO, M. M. M. **Estudo da Bacia do Ribeirão Anhumas visando os problemas de inundação e alagamentos**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p. 74. 2022.

CHEN, J. et al. Influence of urbanization on the hydrological process of the flash flood. **Science of The Total Environment**, v. 609, p. 1378-1390, 2017.

CHOW, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). **Applied Hydrology**. McGraw-Hill. **COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ. Plano de Bacia do Rio Sapucaí - 2º Ciclo**. 2016.

CROITORU, A. E.; PITICAR, A.; BURADA, D.C. Changes in precipitation extremes in Romania. **International Quaternary**, v. 415, p. 325-335, 2016.

COSTA, K. T.; FERNANDES, W. S. (2015). **Avaliação do tipo de distribuição de probabilidades das vazões máximas diárias anuais no Brasil**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, RBRH vol. 20 nº.2-Abr/Jun, p. 442 - 451.

COUTINHO, Artur Paiva et al. O efeito do método de desagregação de chuva no hidrograma de projeto para uma bacia hidrográfica rural no semiárido nordestino. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, p. 146-156, 2019.

CLARKE, R.T. Hidrologia Estatística. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS. Livro da Coleção ABRH, Cap. 17, 1993.

DINIZ, N.; SILVA, B. C. Impactos da Urbanização na Qualidade de Água da Bacia do Ribeirão José Pereira, Itajubá/MG. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 21., 2015, Brasília – DF. **Anais [...]** Brasília – DF: ABHR, 2015, p. 1-8.

DNIT. **Manual de Hidrologia Básica para estruturas de drenagem**. Rio de Janeiro, 2005. 133p.



ELETROBRÁS (2000). **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Centrais Elétricas Brasileiras S.A., 458 p.

FAKHREDDINE, M. A. et al. Flash flood modelling using geospatial and meteorological data: A case study in Klang River Basin, Malaysia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, v. 7, n. 3, p. 1045-1060, 2016.

FENG, D. et al. Application of a distributed hydrological model for the estimation of flood inundation in the Poyang Lake basin, China. *Water Resources Management*, v. 28, n. 12, p. 4369-4386, 2014.

FERREIRA, J. L. Estudo hidrológico da bacia do Ribeirão José Pereira - Itajubá/MG. 2018. 55 f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)** - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

FERNANDES, C. Microdrenagem - Um Estudo Inicial. Campina Grande: DEC/CCT/UFPB, 2002. 196 p.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

FONSECA, L. V. **Desenvolvimento de ferramenta computacional para determinação de parâmetros hidrológicos aplicados à microdrenagem urbana**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Centro Universitário de Formiga – UNIFOR-MG. Formiga – MG, 2017. 73 p.

FOWLER, H.J.; LENDERINK, G.; PREIN, A.F. WESTRA, S.; ALLAN, R. P.; BAN, N.; BARBERO, R.; BERG, P.; BLENKINSOP, S.; DO, H. X.; GUERREIRO, S.; HAETER, J. O.; KENDON, E. J.; LEWIS, E.; SCHAER, C.; ASHISH, S.; VILLARINI, G.; WASKO, C.; ZHANG, X. Anthropogenic intensification of short-term precipitation extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 2, p. 107-122, 2021

FUNDAÇÃO INSTITUTO DE GEOTÉCNICA DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO-Fundação Geo-Rio. **Relatório de Correlação entre Chuvas e Escorregamentos para a Cidade do Rio de Janeiro no ano de 2010**. D'ORSI, R. N. et al. (Org.) Relatório GEO-RIO/DEP/GPENº10/2012. Disponível em: [http://sistema-alerta rio.com.br/wpcontent/uploads/2016/08/Relatorio\\_Escorregamentos\\_2010.pdf](http://sistema-alerta rio.com.br/wpcontent/uploads/2016/08/Relatorio_Escorregamentos_2010.pdf). Acesso em: 02 Fev. 2024.

G1. **Forte chuva alaga ruas, inunda casas e até salas da Unifei em Itajubá**, MG. G1 Sul de Minas, Itajubá, 27 fev. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2023/02/27/forte-chuva-alaga-ruas-inunda-casas-e-ate-salas-da-unifei-em-itajuba-mg.ghtml>. Acesso em: 14 maio 2023.

GABINI, E.; CEPPI, A.; RAVAZZANI, G.; MANCINI, M.; VALSECCHI, I. Q.; CUCCHI, A.; NEGRETTI, A.; TOLONE, I. An empirical rainfall threshold approach for the civil protection flood warning system on the Milan urban area. *Journal of Hydrology*, v. 628, p. 130513, 2024.

GAO, P.; WANG, X.; XU, B.; XIAO, P.; ZHANG, X.; JIAO, X. Coupling of hydrological model and 2D hydraulic model using GIS: A case study of flood simulation in Jinan, China. *Journal of Hydrology*, v. 539, p. 74-87, 2016.

- GOLDENFUM, J. A. Pequenas bacias hidrográficas: conceitos básicos. In: PAIVA, E. M. C. D. de; PAIVA, J. B. D. de (Org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, p.3-13, 2003.
- GOMES, J. R. M. et al. Ocorrência de enchentes em Itajubá - MG: causas e consequências. **Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Belém, PA, 2020. Disponível em: <https://www.cbmet2020.com.br/cbmet/anais/resumos/R0676-1.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2023.
- GOMES, J. V. et al. Modelagem hidrológica distribuída para simulação de vazão em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, n. 2, p. 88-99, 2017.
- GOUDARD, G. **Eventos pluviais extremos e riscos hidrometeorológicos híbridos na Bacia do Alto Iguaçu (Paraná)**. 236f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de pós-graduação em Geografia - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- GONTIJO, N. T. **Avaliação das Relações de Frequência entre precipitações e enchentes raras por meio de séries sintéticas e simulação hidrológica**. Belo Horizonte: UFMG – Tese de Mestrado, 2007.
- GPRH, G. DE P. EM R. H.; IGAM, I. M. DE G. DAS Á. **Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do processo de outorga no Estado de Minas**. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2012.
- GRANDRY, M. et al. A method for low-flow estimation at ungauged sites: a case study in Wallonia (Belgium). **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 4, p. 1319–1330, 8 abr. 2013.
- HEC-HMS. Hydrologic modeling system. **User's manual**. Version 4.3. US Army Corps of Engineers, 2018.
- HOEDJES, J., KOOIMAN, A., MAATHUIS, B., SAID, M., BECHT, R., LIMO, A., ... SU, B. (2014). Conceptual Flash Flood Early Warning System for Africa, Based on Terrestrial Microwave Links and Flash Flood Guidance. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, 3(2), 584–598. <https://doi.org/10.3390/ijgi3020584>
- HORN, J. F. C. **Estimativa de vazão com dados escassos: novas hipóteses para o Método Silveira**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- HOU, A. Y., KAKAR, R. K., NEECK, S., AZARBARZIN, A. A., KOJIMA, M., KUMMEROW, C. D., SKOFRONICK-JACKSON, G. The Global Precipitation Measurement Mission. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 5, p. 701-722, 2014.
- HUFF, F.A. (1967) Time distribution of rainfall in heavy storms. **Water Resources Research**, v. 3, n. 4, p. 1007-1019.
- HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; WOLFF, D. B.; ADLER, R. F.; GU, G., STOCKER; E. F. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 1, p. 38-55, 2012.

INPE. (s.d.). **Topodata**. Recuperado em 14 de abril de 2023, de <http://www.dpi.inpe.br/topodata/index.php>.

**INMET - Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>. Acesso em: 14 abr. 2023.

ITAJUBÁ. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Itajubá**. Itajubá: Prefeitura Municipal de Itajubá, 2018.

JIANG, Y. et al. Improving hydrological simulations of a forested watershed by integrating remote sensing data with a distributed hydrological model. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 391-405, 2016.

JOSHI, N.; GUPTA, A.; JOSHI, R.; PRASAD, K. B.; AGARWAL, R. K.; SHARMA, P. K. Flood risk zone mapping using remote sensing and GIS: a case study of the Kosi River basin. **Natural Hazards**, v. 89, n. 1, p. 103-121, 2017.

KUNDZEWICZ, Z. W.; MATCZAK, P.; CHORYNSKI, A.; DABROWSKI, J.; HYSKI, K.; WYZGA, B.; ZAWIEJSKA, J. Advanced modelling techniques for urban hydrology and water management. **Environmental Modelling & Software**, v. 102, p. 130-151, 2018.

LASHERMES, B., LEBLOIS, E., & CREUTIN, J. D. (2018). Combining high-resolution rainfall observations with hydrological modeling for flash flood early warning. **Journal of Hydrology**, 556, 899-914.

LEE, Y. S. et al. Flood hazard mapping using remote sensing and geographic information systems in a data-sparse region: A case study of the Kosi River basin, India. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 22, p. 8034-8054, 2018.

LIMA, O. Distribuição de solos em catenas e mapeamento pedológico de sub-bacia hidrográfica piloto na região de Itajubá-MG. 2012. 116f. **Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos)** - Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

LIMA, W. de. **Manejo de bacias hidrográficas**. São Paulo: Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz/USP, 1996.

LIMA, J. G.; PINTO Jr., O.; OLIVEIRA, L. J. C. Radar meteorológico e a previsão de tempo. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, [S.l.], v. 31, n. 3, p. 103-111, set. 2019. DOI: 10.1016/j.ctmat.2019.06.004.

LIU, B.; CHEN, J.; CHEN, X.; LIAN, Y.; WU, L. Uncertainty in determining extreme precipitation thresholds. **Journal of Hydrology**, v. 503, p. 233-245, 2013.

LIU, Y., GAO, X., LI, Y., LI, J., LI, Y., & LI, L. (2020). Effects of urbanization on flash floods in the Qinling Mountains of China. **Science of The Total Environment**, 710, 135456.

MACHADO, P. J. de O.; TORRES, F. T. P. **Introdução à hidrogeografia**. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

McCUEN, R. H., WONG, S. L., RAWLS, W.J. Estimating urban time of concentration. **Journal of Hydraulic Engineering**, vol. 110, n.7, ASCE, pp 887-904. 1984.

- MEDEIROS, J. S. et al. Soil fertility and productivity in a Cambisol under different land uses in the Brazilian semiarid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 9, p. 607-612, 2018.
- MEDEIROS, V. S.; BARROS, M. T.; Metodologia Para Classificação De Eventos Extremos De Precipitação Em São Luís Do Paraitinga-Sp. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1-8, 2013.
- MENDONÇA, R. A. F., & CAVALCANTI, I. F. A. (2021). Analysis of the Extreme Events in Brazil in 2020. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 36(3), 311-320.
- MENEZES, A. F. et al. Caracterização hidrológica da bacia do Rio doce: aplicação do modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180100>.
- MENDES, R. M. VALERIO FILHO, M. BERTOLDO, M. A. Estudos de Limiars Críticos Deflagradores de Deslizamentos no Município de São José dos Campos – SP (Brasil). **Associação portuguesa de riscos, Prevenção e segurança, imprensa da universidade de Coimbra**. Territorium, 22. 2015, p. 119 – 129.
- MENDES, K. F. et al. Uso e manejo dos solos hidromórficos da Amazônia: Revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 9, e1489970, 2019.
- MOLINA, E. A. N.; CARDOSO, A. O. NOGUEIRA, F. R. Relação Precipitação – Deslizamento no Município de São Bernardo do Campo – SP. **Ciência e Natura – Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM**. Santa Maria, v. 37, 2015, p. 46-54.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. (2007). **Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations**. American Society of Agricultural and Biological Engineers. v. 50(3), p. 885-900.
- MUDAU, L. S. et al. An Automatic Weather Station (AWS) for environmental monitoring in Limpopo Province, South Africa. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 124, p. 102923, 2021.
- NORBIATO, D., BORGA, M. ESPOSTI, S. D., GAUME, E. ANQUETIN, S. N. Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins. **Journal of Hydrology**, v. 362, n. 3-4, p. 274-290, 2008.
- OLIVEIRA, C. et al. Medição de chuva em pluviômetros convencionais: um estudo de caso em Belém do Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 309-318, 2016.
- OLIVEIRA, G. G. BRUBACHER, J. P. QUEVEDO, R. P. GUASSELLI, L. A. **LIMIARES DE CHUVA PARA A OCORRÊNCIA DE DESASTRES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOS SINOS, RS**. 2012.
- OLIVEIRA, J. A. N. F. **Delimitação de Bacias Hidrográficas Utilizando o QGIS: Aplicação na Bacia do Curu**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia Civil, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade de Fortaleza UNIFOR. Fortaleza, p. 93. 2017.

OLIVEIRA, M. S. Impactos da ocupação urbana na bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira: estudo de caso em Itajubá-MG. **Dissertação (Mestrado em Geografia)** - Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

OLIVEIRA, R. J.; MARTINS, A. S. A utilização do modelo hidrológico HEC-HMS para previsão de cheias em bacias hidrográficas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, n. 3, p. 1-13, 2019.

OLIVEIRA, V. A. D. E. **Regionalização de vazões nas regiões das unidade de planejamento e gestão de recursos hídricos GD1 e GD2, Minas Gerais**. Brasil: Universidade Federal de Lavras, 2013.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. The Human Cost of Disasters 2000-2019. A review of the last two decades. **United Nations Office for Disaster Risk Reduction**. 2021.

PASSOS, F. O. **Avaliação de impactos de mudanças no uso e manejo do solo sobre as vazões da Bacia do Ribeirão José Pereira, utilizando o Modelo SWAT**. 2017. 114f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Curso de Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itajubá, 2017.

PATRÍCIO, K. F; CADORIN, S. B.; BACK, A. J. Métodos de estimativa de vazão máxima para projetos de macrodrenagem urbana. **Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil Unesc-CIVILTEC**, v. 4, n. 1, p. 54-72, 2021.

PEREIRA, S.; ZÊZERA, J. L.; BATEIRA, C. Potencialidades dos limiares empíricos de precipitação para o desencadeamento de fluxos de detritos e de lama na região norte. *In: VI Seminário LatinoAmericano de Geografia Física; II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física*. Universidade de Coimbra, Maio de 2010, p.1-15.

PFAFSTETTER, O. **Chuvas intensas no Brasil: Relação entre precipitação, duração e frequência em 98 postos com pluviógrafos**. Rio de Janeiro: DNOS - Departamento Nacional de Obras e Saneamento do Ministério da Viação e Obras Públicas, 1957.

PONCE, V. M. **Engineering Hydrology: principles and practice**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1989. 640p.

PORTO, R. L. et al. **Hidrologia Aplicada**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

PRASAD, R. K. et al. Application of remote sensing and GIS techniques for flood risk analysis: A case study at district Jhelum, Pakistan. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 7, n. 7, p. 2943-2955, 2014.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAJUBÁ. Plano Municipal de Contingência para Enchentes e Inundações. **Itajubá: Secretaria Municipal de Defesa Social**, 2023.

Projeto MapBiomas – Coleção MapBiomas 10 metros da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em [data] através do link: <https://brasil.mapbiomas.org/mapbiomas-cobertura-10m/>. Acesso em: 14 dez. 2024.

PRUSKI, F. F. et al. Low-flow estimates in regions of extrapolation of the regionalization equations: a new concept. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 5, p. 808–816, 2015.

- PRUSKI, F.F. et al. Hidros: Dimensionamento de sistemas hidroagrícolas. Viçosa: Ed. UFV, 2006. 259 p
- RENSCHLER, C. S. et al. Urban flash flood warning and response: the experience of the June 2007 flood in the Syracuse metropolitan area, New York, USA. **Journal of Environmental Management**, v. 183, p. 697-706, 2016.
- REICHENBACH, P., CARDINALI, M., DE VITA, P., GUZZETI, F. Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (Central Italy). **Environmental Geology**, 35, 146–159. 1998.
- REIS, J. A. T. et al. Indicadores regionais aplicáveis à avaliação do regime de 39 vazão dos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio itabapoana. **Geociências**, v. 27, n. 4, p. 509–516, 2008.
- RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. São José dos Campos: INPE. 2003.
- REZENDE, V. S.; RIBEIRO, V. O.; MENDES, Y. S. Determinação dos valores de número de deflúvio (CN) para o perímetro urbano de Dourados-MS. *In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL*, 7., 2018, Jardim, MS. Anais... Jardim: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2018. p. 230-239.
- RIBEIRO, A. F. et al. Modelagem hidrológica de bacias hidrográficas: uma revisão dos métodos determinísticos e estocásticos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 10, p. 685-695, 2017.
- ROCHA, J. S. M.; KURTZ, S. M. J. M. **Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas**. Santa Maria: Editora da UFSM, 282p. 2001.
- SALVADORE, E.; BRONDERS, J.; BATELAAN, O. Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. **Journal of hydrology**, v. 529, p. 62-81, 2015.
- SANTORO, J. et al; **Correlação entre chuvas e deslizamentos ocorridos durante a operação do plano preventivo de defesa civil em São Paulo**. 7º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, São Paulo, 2010.
- SANTOS, F. B.; LIMA, J. E. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do ribeirão José Pereira - Itajubá/MG. *In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UNIFEI*, 14., 2016, Itajubá. Anais eletrônicos [...]. Itajubá: UNIFEI, 2016.
- SANTOS, F. M.; LOLLO, J. A. Cartografia digital para estimativa de escoamento superficial visando ao planejamento urbano. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 3, p. 663-675, 2016.
- SANTOS, L. L. Modelagem hidrológica para previsão de vazões em uma bacia hidrográfica. *In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS*, 16., 2015, Goiânia. Anais... Goiânia: UFG, 2015.
- SANTOS, R. F. (org.) Vulnerabilidade Ambiental. **Ministério do Meio Ambiente (MMA)**. Brasília, 2007.
- SANTOS, R. F. et al. Avaliação dos riscos associados às enchentes no ribeirão José Pereira em Itajubá-MG. **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**, Salvador,

BA, 2021. Disponível em: [http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2021\\_TN\\_STO\\_332\\_23324.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2021_TN_STO_332_23324.pdf). Acesso em: 05 mar. 2023.

SANTOS, R. R. et al. **Aplicação do modelo hidrológico HEC-HMS para identificação de áreas vulneráveis a enchentes em uma bacia hidrográfica.**, v. 22, n. 4, p. 711-718, 2017.

SANTOS, R. V.; SANTOS, C. A.; PEREIRA, L. S.; DIAS, H. C. T. Caracterização de eventos extremos de precipitação na região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, n. 4, p. 1-11, 2019.

SÁVIO, A. F. et al. Modelagem hidrológica em bacias hidrográficas: uma revisão dos modelos distribuídos e concentrados. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, e10, p. 1-14, 2018.

SHARMA, A. K.; TIWARI, K. N. Hydrological and hydraulic modeling coupled with geospatial tools for flood prevention and management. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 6, p. 1-12, 2017.

SEGONI, S.; PICIULLO, L.; GARIANO, S. L. A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. **Landslides**, 15, 1483–1501. 2018.

SILVA, C. A. et al. Qualidade do solo em áreas de cultivo de café na bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 11, p. 794-798, 2018.

SILVA, J. A. B. et al. Mudanças climáticas e os impactos na saúde humana: um estudo de revisão. **Revista Eletrônica do Curso de Direito da UFSM**, v. 13, n. 2, p. 28-41, 2018.

SILVA, J.P.R.; REBOITA, M. S.; MATTOS, E. V.; LEMES, M. C. R. Estudo de um caso de transbordamento do Ribeirão José Pereira em Itajubá–Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

SILVA, R. A. et al. Modelagem hidrológica em bacias hidrográficas de pequeno porte: estudo de caso na bacia do ribeirão José Pereira, Itajubá/MG. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 23., 2020, Natal. Anais eletrônicos [...]. Natal: ABRH, 2020.

SILVA, R. F. et al. Caracterização Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Ribeirão José Pereira em Itajubá - MG. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 51, n. 2, p. 297-309, 2021.

SILVEIRA, A. L. L. Equação para os coeficientes de desagregação de chuva. **Rbrh: Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, RS. Vol. 5, n. 4 (out./dez. 2000), p. 143-147, 2000.**

SILVEIRA, G. M. Equações empíricas para o cálculo do tempo de concentração em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 3, p. 65-74, 2005.

SILVEIRA, G. L.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. DA. Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 3, p. 111–131, 1998.

SILVINO, A. N. O.; SILVEIRA, A.; MUSIS, C. R.; WYREPKOWSKI, C. C.; CONCEIÇÃO, F. T. Determinação de vazões extremas para diversos períodos de retorno para o Rio Paraguai utilizando métodos estatísticos. **Geociências**, 2007.

- SMITH, J. A.; BAECK, M. L.; BERNHARDT, M.; BOOTH, D. B.; HAMILL, T. M.; KELLY, R. E. J.; MUNICINO, R.; PALMER, R. N.; STEIN, T. V.; TANAKA, T. Flash Floods: Observations, **Modelling and Warning Services**. 1ª ed. Geneva, Switzerland: WMO-World Meteorological Organization, 2016.
- SOARES, M. R. G. J., FIORI, C. O., SILVEIRA, C. T., KAVISKI, E. Efficiency of the curve number method of rainwater retention. **Mercator (Fortaleza)**, v. 16, n. 4, 2017.
- SOARES, P. A.; PINHEIRO, A.; HEIL, K. Estimativa da disponibilidade hídrica em pequenas bacias hidrográficas com escassez de dados fluviométricos. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 12, p. 29–38, 2010.
- SOUSA, J. J.; GOMES, L. A. S.; VITORINO, M. I.; SILVA, E. A.; COSTA, G. A.; RODRIGUES, L. B. Uso de sensoriamento remoto e geoprocessamento na análise hidrológica de bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 2, n. 1, p. 48-58, 2014.
- SOUZA, A. B. Impactos ambientais das indústrias na bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira. *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 12, p. 1256-1262, 2018.
- SOUZA, L. S. et al. Caracterização física da bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira, Itajubá/MG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 4, p. 747-757, 2016.
- STEFFEN, J. L.; RONDON, M.A.C. Determinação da vazão de projeto em bacias urbanas. *In: Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Porto Alegre – RS, 2.000.
- SWEENEY, T., 1992: **Modernized areal flash flood guidance**. NOAA Tech. Rep. NWS HYDRO 44, NOAA/NWS/Hydrologic Research Laboratory, Silver Spring, MD, 21 pp. 1 an appendix.
- TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L.E.S., ROCHA, M.C.M. Modelamento numérico da análise de correlação entre chuvas e escorregamentos aplicado às encostas da serra do mar, município de Cubatão. **5º Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia**, ABGE, São Paulo: 237-248. 1987.
- The American Society of Civil Engineers (ASCE). Hydrologic Design of Small Drainage Structures. **ASCE Manual and Reports on Engineering Practice No. 87**. 1992.
- TUCCI, C. E. M. 1997. **Hidrologia: ciência e aplicação** 2.ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).
- TUCCI, C. E.M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades, 2005.
- TUCCI, C. E. M. BERTONI, J. C. (org.) **Inundações Urbanas na América do Sul**. 1ª ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.
- TUCCI, C. E. M.; CLARKE R. T. Regionalização hidrológica. In: PAIVA, E. M. C. D. de; PAIVA, J. B. D. de (Org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, p.3-13, 2003.



- VITALE, V. et al. A modelling approach for assessing the impact of urbanization on flash flood events: A case study in southern Italy. **Journal of Hydrology**, v. 552, p. 329-341, 2017.
- UCAR, 2010. Flash Flood Early Warning System Reference Guide. University Corporation for Atmospheric Research. Disponível em: < [https://www.meted.ucar.edu/hazwarnsys/haz\\_fflood.php](https://www.meted.ucar.edu/hazwarnsys/haz_fflood.php)>. Acesso em: 03 jan. 2024.
- VALENTIM, Lucas Ricardo; GOMES, Júlio. Avaliação da sensibilidade de distribuições de probabilidades aplicadas aos estudos hidrológicos de vazões máximas. *In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Florianópolis, SC, 2017.
- VISSMAN JR., W.; LEWIS, G. L.; KNAPP, J. W. Introduction to Hydrology. 2nd ed. **New York: Harper Collins College Publishers**, 2002.
- VILA, D. A.; GONCALVES, L. G. G. de; TOLL, D. L.; ROZANTE, J. R. Statistical Evaluation of Combined Daily Gauge Observations and Rainfall Satellite Estimates over Continental South America. **Journal of Hydrometeorology**, v. 10, n. 2, p. 533–543, 2009. ISSN 1525-755X.
- WANG, H. et al. Influence of land use/land cover change on flood hazard in the Wei River Basin, China. **Science of The Total Environment**, v. 649, p. 1366-1375, 2019.
- WANG, Z. et al. Characteristics of flash floods in the Taihu Lake Basin, China. **Journal of Hydrology**, v. 568, p. 692-703, 2019.
- WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: Cetesb, 1978. 477 p.
- WMO. Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report. World Meteorological Organization. Koblenz: [s.n.]. Disponível em: < [https://wmo.int/pages/prog/hwrp/publications/low-flow\\_estimation\\_prediction/WMO](https://wmo.int/pages/prog/hwrp/publications/low-flow_estimation_prediction/WMO)>. Acesso em: 13 ago 2023.
- WU, J. et al. Impact of urbanization on flash flood characteristics based on a long-term observational dataset in a peri-urban area. **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 125423, 2020.
- WU, Q. et al. Modeling the impact of urbanization on runoff and flooding in a rapidly developing region of China. **Science of The Total Environment**, v. 769, p. 144626, 2021.
- XIAO, Y. et al. Flood inundation mapping using hydraulic and remote sensing data: A case study in the lower Mekong River Basin. **Water Resources Management**, v. 31, n. 14, p. 4521-4535, 2017.
- VILLELA, S. M; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Editora McGraw Hill do Brasil, 1975. 245 p.
- ZHANG, Q. et al. Modeling the effects of urbanization on flash flood hydrology using a distributed hydrological model. **Journal of Hydrology**, v. 548, p. 748-763, 2017.
- ZHANG, Q. et al. A comprehensive review of urban flood warning systems: Frameworks, methodologies, and future directions. **Journal of Hydrology**, v. 598, p. 126364, 2021.
- ZHANG, Y. et al. Multi-scale analysis of flood risk in Poyang Lake Basin, China: Integrating remote sensing, GIS and DEM. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 15, n. 10, p. 2241-2251, 2015.

ZHOU, Q.; FANG, G.; CHEN, B. Quantifying the impact of urbanization on the urban flash flood process using the Storm Water Management Model. **Journal of Hydrology**, [S.l.], v. 574, p. 361-372, 2019.

ZHOU, W. et al. The integration of remote sensing and hydrological modeling for the study of the impact of the Three Gorges Project on the Yangtze River, China. *Remote Sensing*, v. 7, n. 5, p. 5848-5872, 2015.

ZOU, Y.; CHEN, X.; SONG, X. A comparative study of flood risk management strategies in urbanized coastal areas: A case study of Ningbo, China. **Science of The Total Environment**, [S.l.], v. 753, p. 141912, 2021.

**ANEXOS**

**ANEXO A – Eventos simulados no HEC-HMS**

Figura 35 – Evento 29/11/2013.

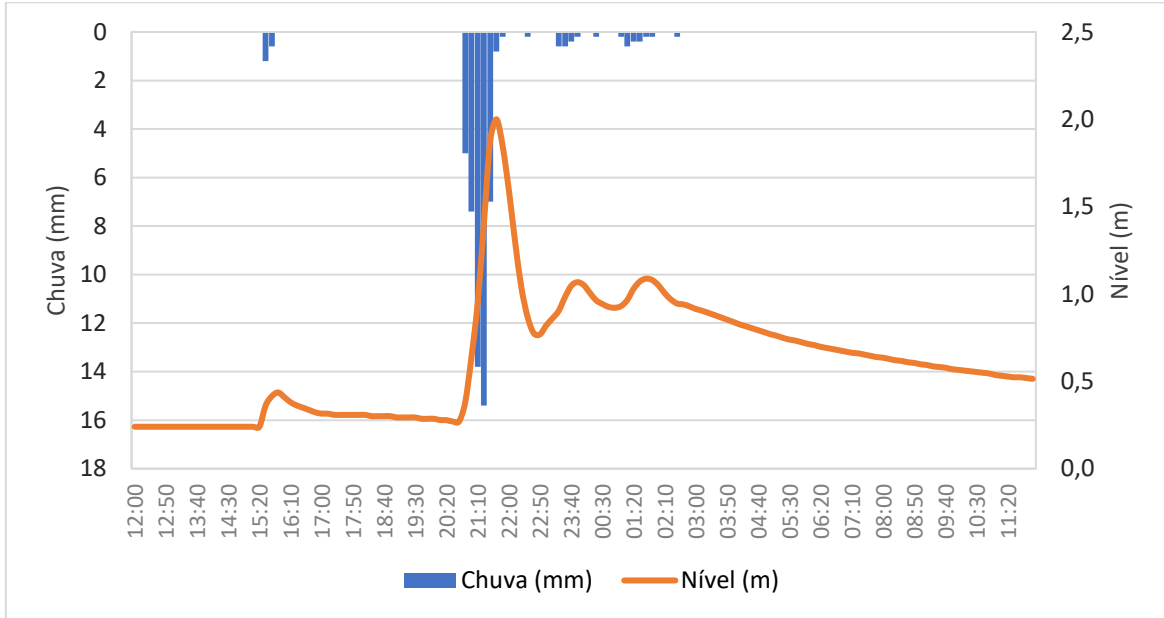


Figura 36 – Evento 25/01/2015.

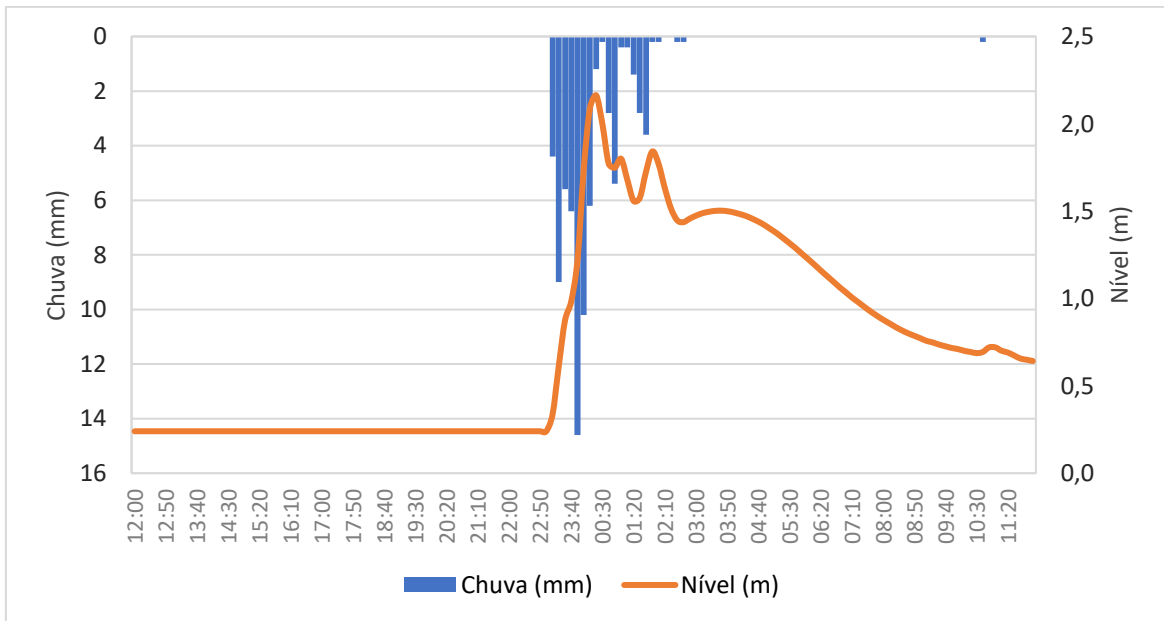


Figura 37 – Evento 27/02/2017.

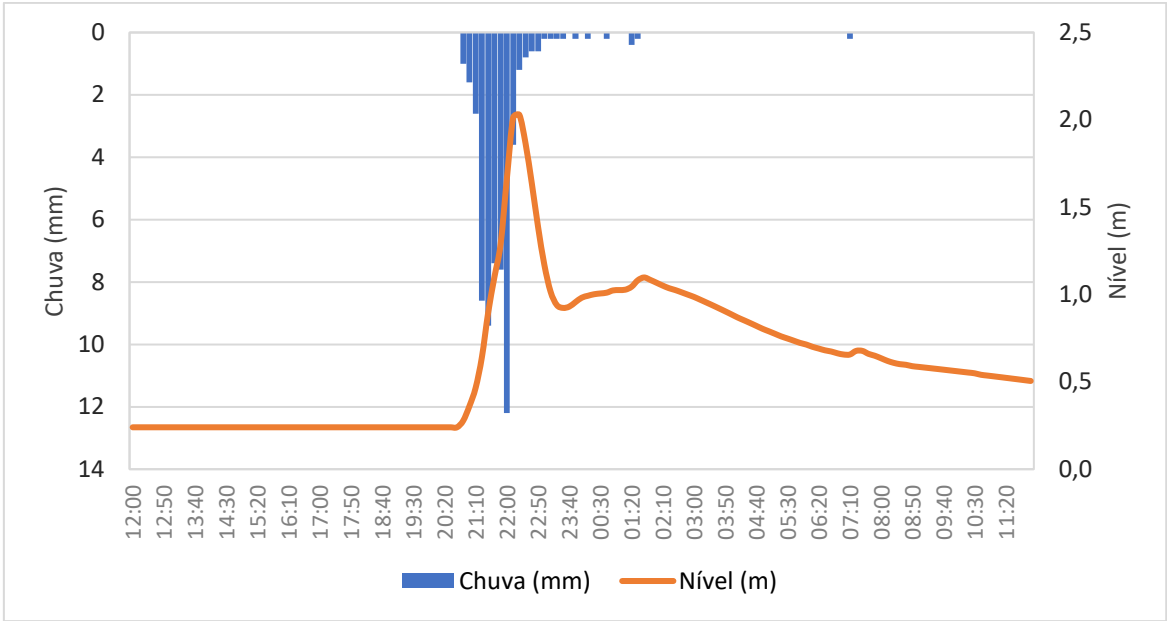


Figura 38 – Evento 19/05/2017.

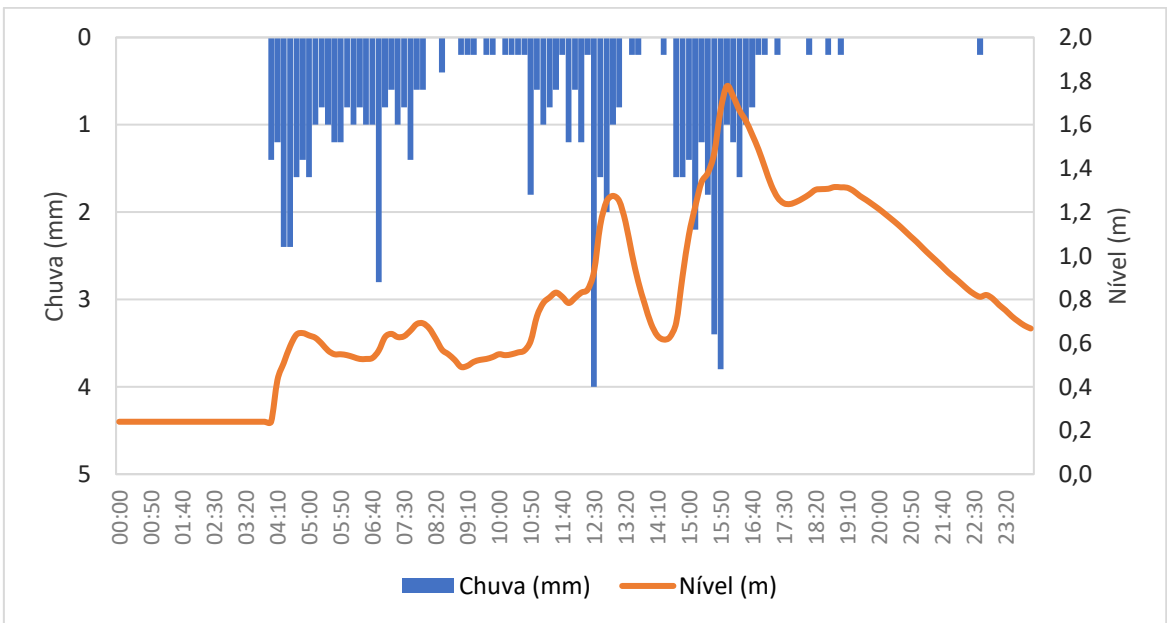


Figura 39 – Evento 13/02/2018.

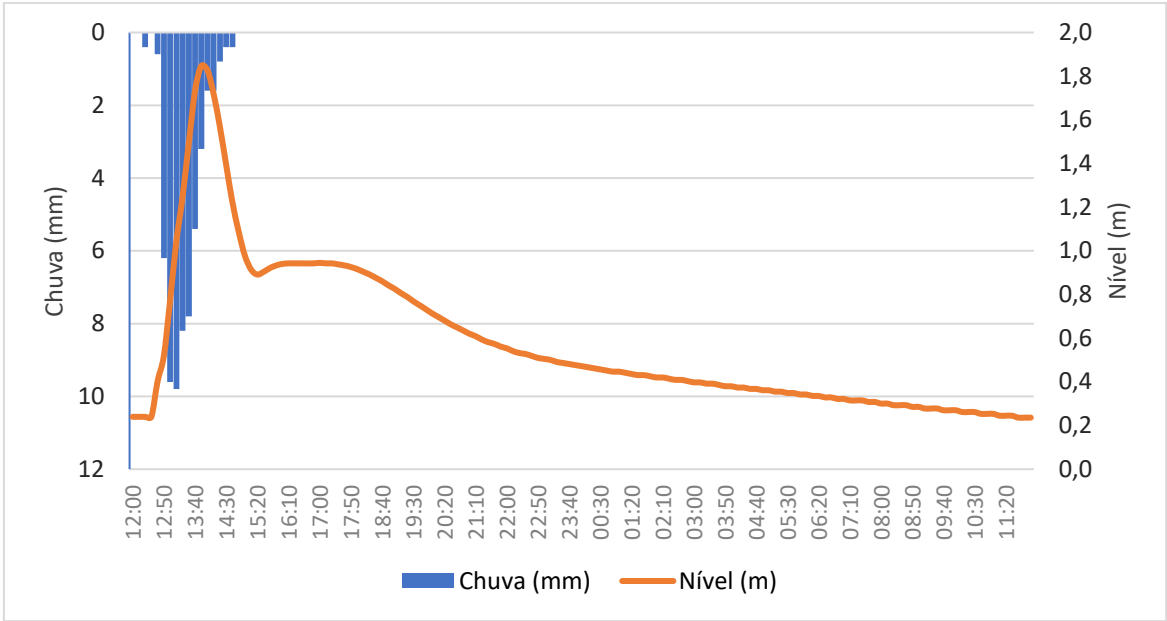


Figura 40 – Evento 08/10/2018.

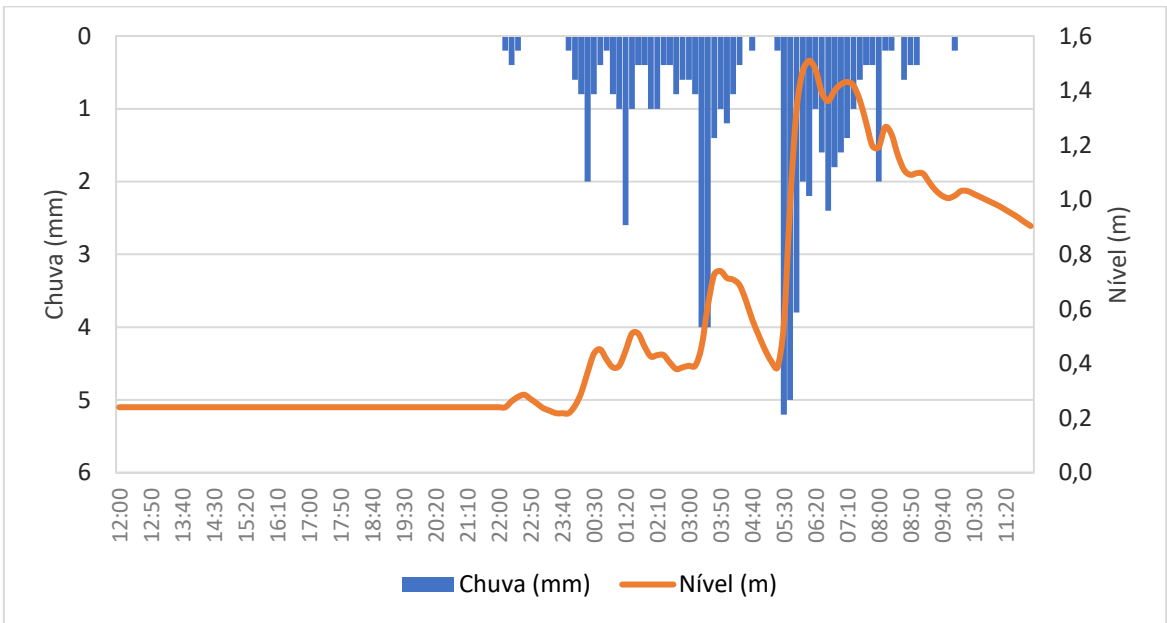


Figura 41 – Evento 10/02/2020.

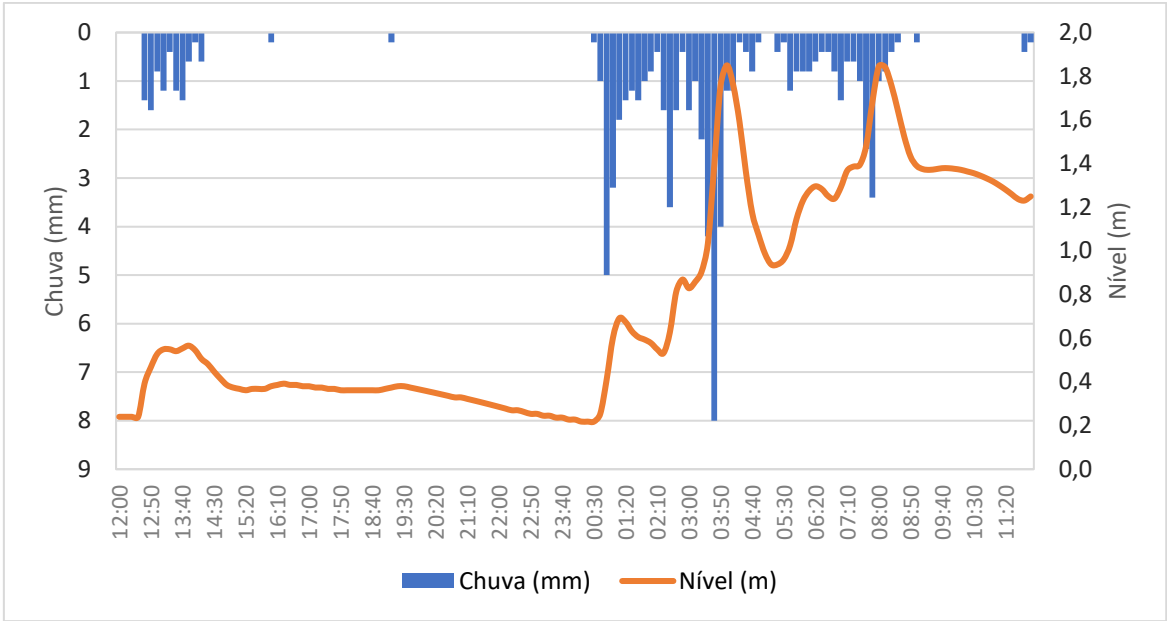


Figura 44 – Evento 12/12/2020.

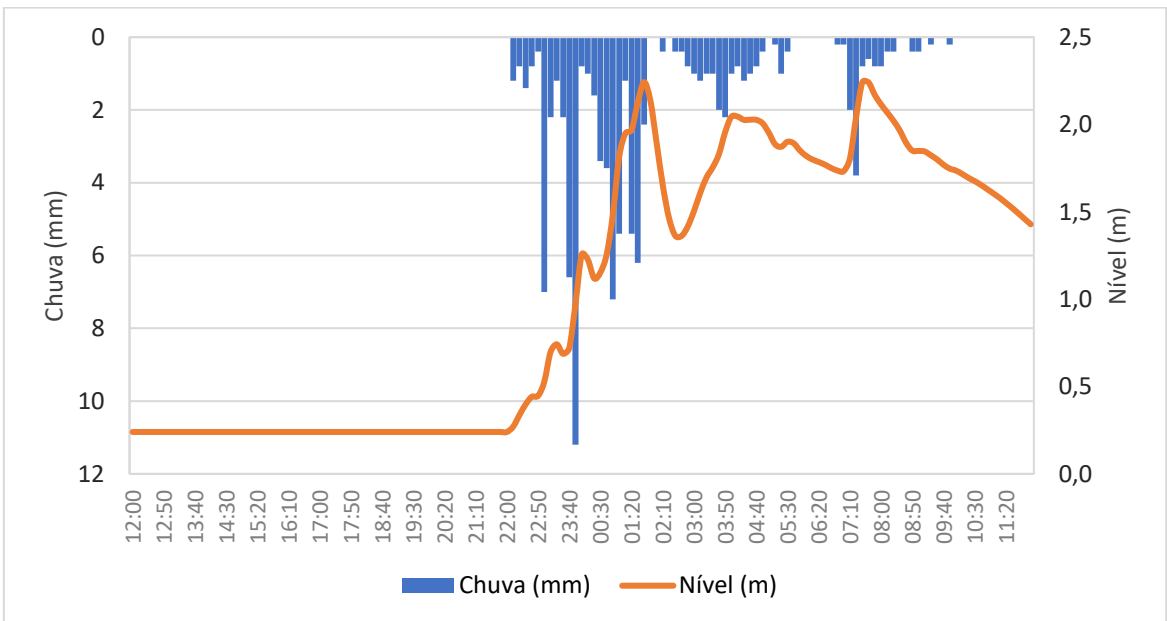


Figura 43 – Evento 18/11/2021.

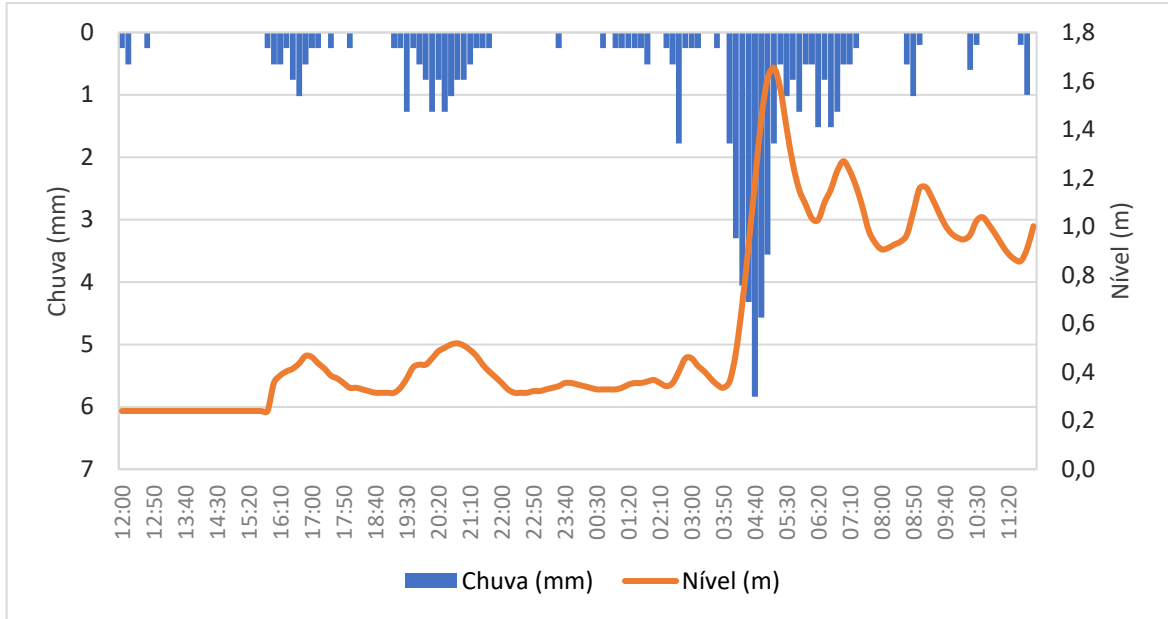


Figura 44 – Evento 09/01/2023.

