

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA  
*CAMPUS LAGOA DO SINO*

PEDRO RAMOS GALVÃO

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DE  
CONTRIBUIÇÃO DA CONFLUÊNCIA DOS RIOS  
ITAPETININGA E PARANAPANEMA**

Buri  
2025

PEDRO RAMOS GALVÃO

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO DA  
CONFLUÊNCIA DOS RIOS ITAPETINGA E PARANAPANEMA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Centro de Ciências  
da Natureza da Universidade  
Federal de São Carlos para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Anai  
Floriano Vasconcelos

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria  
Clara Fava

Galvão, Pedro Ramos

Modelagem hidrológica da bacia de contribuição da  
confluência dos rios Itapetininga e Paranapanema /  
Pedro Ramos Galvão -- 2025.  
65f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,  
campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Anaí Floriano Vasconcelos

Banca Examinadora: Anaí Floriano Vasconcelos, Erica  
Acioli Canamary, Marcos Roberto Benso

Bibliografia

1. Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema. 2. Gestão  
de riscos de inundações. 3. Modelagem hidrológica. I.  
Galvão, Pedro Ramos. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática  
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR


Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA  
CAMPUS LAGOA DO SINO

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL


**Folha de Aprovação**

Assinatura dos membros da Comissão Examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do candidato Pedro Ramos Galvão, realizada em 24/01/2025:

Documento assinado digitalmente  
 ANAI FLORIANO VASCONCELOS  
Data: 24/01/2025 17:43:15-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> **Anaí Floriano Vasconcelos** – Orientadora  
Departamento de Ciências Ambientais – UFSCar – *Campus* São Carlos

Documento assinado digitalmente  
 ERICA ACIOLI CANAMARY  
Data: 24/01/2025 16:56:43-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr.<sup>a</sup> **Erica Acioli Canamary**  
Centro de Ciência do Sistema Terrestre – INPE – *Campus* São José dos Campos

Documento assinado digitalmente  
 MARCOS ROBERTO BENSO  
Data: 24/01/2025 16:37:43-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. **Marcos Roberto Benso**  
Departamento de Engenharia Civil – UFSCar – *Campus* São Carlos

*À minha vó Maria (in memoriam).*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, pelo apoio incondicional, por sempre acreditarem em mim e me incentivarem em cada escolha, independentemente de qual seja.

Agradeço às minhas irmãs, Amanda, Samara e Soraya, por estarem sempre ao meu lado.

Agradeço aos meus amigos, que tornaram essa jornada mais especial. Em especial, Beatriz Oliveira, Daniela Pimenta, Giovanna Medina, Milena Andrade, Nathália Fischer e Priscila Mistro, que vivenciaram a graduação ao meu lado, compartilhando e escrevendo momentos e histórias inesquecíveis. Não deixo de citar Gabriela Bonini, Gabriella Borges, Giovanna Andrade e Igor Torres, que também contribuíram para que essa caminhada fosse mais leve.

Agradeço à minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Anáí Floriano Vasconcelos, que foi a melhor orientadora que eu poderia ter. Sou imensamente grato pelo suporte, orientação, incentivo, paciência e resiliência ao longo desses quase três anos de parceria. Me proporcionou oportunidades, me mostrou a beleza da academia e fomentou meu interesse pela ciência.

Agradeço à minha coorientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Clara Fava, pelo acompanhamento, pelas contribuições e também por me proporcionar diversas oportunidades e possibilidades.

Agradeço aos membros do projeto de pesquisa, que colaboraram para que este TCC se concretizasse, contribuindo com horas de reuniões e acompanhamento nos desafios que surgiram, principalmente durante a modelagem. Em especial, à Gabriela Cildo, minha parceira de campo, trabalho, simpósio e com quem dividi essa jornada acadêmica da graduação.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de Iniciação Científica e pelo financiamento do projeto Avaliação de ferramentas de modelagem hidrológica de diferentes complexidades para mapeamento de áreas de inundação de bacias rurais com dados escassos, por meio da Chamada CNPq/MCTI/FNDCT N° 18/2021.

*“Somos a primeira geração a sentir o impacto das mudanças climáticas  
e a última geração que pode fazer algo a respeito.”*

*Barack Obama*

## RESUMO

No atual cenário de mudanças climáticas, a manutenção dos padrões de desenvolvimento ampliaria a exposição e a vulnerabilidade de ecossistemas e populações a ameaças climáticas. Mesmo limitando o aquecimento global a 1,5 °C, eventos extremos históricos continuarão a ocorrer. No Brasil, as inundações já causaram perdas econômicas superiores a R\$ 70 bilhões e 644 mortes entre 1991 e 2023, evidenciando a necessidade de aprimorar ferramentas de gestão hídrica. Nesse contexto, a modelagem hidrológica destaca-se como estratégia essencial para previsão e mitigação de desastres, embora sua eficácia dependa da reprodução de padrões complexos em bacias hidrográficas, sobretudo durante extremos climáticos. Este estudo aplicou o modelo HEC-HMS na bacia de contribuição da confluência dos rios Itapetininga e Paranapanema, região historicamente impactada por inundações, visando avaliar sua capacidade de prever vazões adequadamente para esta bacia. Foram adotados métodos como o *SCS Curve Number* para perdas, *SCS Unit Hydrograph* para transformação chuva-vazão, *Muskingum* para propagação do escoamento e *Constant Monthly* para fluxo de base. O modelo foi calibrado com o evento de precipitação extrema de 2004 e os parâmetros obtidos foram aplicados nas simulações dos eventos de 2005, 2011, 2016 e 2017. No exutório, a calibração para 2004 resultou em NSE de 0,700 e  $R^2$  de 0,84, reproduzindo os padrões gerais de escoamento. Entretanto, nos demais anos, os valores de NSE foram negativos ou próximos de zero, e os valores de  $R^2$  majoritariamente próximos de zero. A análise evidenciou a complexidade da bacia, marcada por heterogeneidade e interações dinâmicas entre sistemas fluviais e áreas adjacentes. Os resultados reforçam os desafios inerentes à modelagem hidrológica, especialmente em contextos de extremos climáticos, e destacam a necessidade de aprimoramentos metodológicos. Apesar das limitações, o estudo ressalta oportunidades para inovações capazes de transformar estratégias de mitigação de riscos e fortalecer a resiliência frente às mudanças do clima.

Palavras-chave: Alto Paranapanema; HEC-HMS; previsão de enchentes; gerenciamento de risco; gestão de recursos hídricos; Campina do Monte Alegre.

## ABSTRACT

In the current context of climate change, maintaining existing development patterns would increase the exposure and vulnerability of ecosystems and populations to climate threats. Even if global warming is limited to 1.5 °C, historical extreme events will continue to occur. In Brazil, floods have already caused economic losses exceeding R\$70 billion and 644 deaths between 1991 and 2023, highlighting the need to improve water management tools. In this context, hydrological modeling stands out as an essential strategy for disaster prediction and mitigation, though its effectiveness relies on reproducing complex patterns in river basins, particularly during climate extremes. This study applied the HEC-HMS model to the contributing basin of the confluence of the Itapetininga and Paranapanema rivers, a region historically impacted by floods, to evaluate its ability to adequately predict flows for this basin. Methods such as the SCS Curve Number for Loss, SCS Unit Hydrograph for Transform, Muskingum for Routing and Constant Monthly for Baseflow were adopted. The model was calibrated using the extreme precipitation event of 2004, and the obtained parameters were applied to simulate events from 2005, 2011, 2016, and 2017. At the outlet, calibration for 2004 resulted in a NSE of 0.700 and an  $R^2$  of 0.84, reproducing general runoff patterns. However, in subsequent years, NSE values were negative or near zero, and  $R^2$  values were mostly close to zero. The analysis revealed the basin's complexity, marked by heterogeneity and dynamic interactions between fluvial systems and adjacent areas. The results underscore the inherent challenges of hydrological modeling, particularly in climate extremes, and emphasize the need for methodological refinements. Despite limitations, the study highlights opportunities for innovations capable of transforming risk mitigation strategies and strengthening resilience to climate change.

Keywords: Alto Paranapanema; HEC-HMS; flood prediction; risk management; water resource management; Campina do Monte Alegre.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Divisão Hidrográfica Nacional.....	19
Figura 2: Divisão Hidrográfica do Estado de São Paulo.....	20
Figura 3: Localização da Bacia de Contribuição.....	28
Figura 4: Evidências das Inundações em Campina do Monte Alegre.....	29
Figura 5: Localização das Estações Fluviométricas.....	37
Figura 6: Divisão das Sub-Bacias e Localização dos Pontos de Controle.....	42
Figura 7: Distribuição Espacial dos Valores de CN na Área de Estudo.....	44
Figura 8: Hidrogramas Pré-Calibração do Evento de 2004.....	48
Figura 9: Hidrogramas Pós-Calibração do Evento de 2004.....	49
Figura 10: Hidrogramas do Evento de 2005.....	53
Figura 11: Hidrogramas do Evento de 2011.....	54
Figura 12: Hidrogramas do Evento de 2016.....	55
Figura 13: Hidrogramas do Evento de 2017.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de Modelos Hidrológicos.....	23
Tabela 2: Precipitações Causadoras das Inundações Relatadas na Área de Estudo.....	28
Tabela 3: Valores de <i>Peak Rate Factor</i> .....	33
Tabela 4: Parâmetros Fisiográficos das Sub-Bacias da Área de Estudo.....	41
Tabela 5: Valores de CN e $I_a$ das Sub-Bacias.....	43
Tabela 6: Valores de $t_c$ e $t_p$ das Sub-Bacias.....	45
Tabela 7: Vazões Médias Mensais e Vazões Específicas Mensais da Bacia de Estudo.....	46
Tabela 8: Valores Iniciais de X, K e Sub-Trechos para os Trechos.....	47
Tabela 9: Valores de NSE e $R^2$ para o Evento de 2004.....	50
Tabela 10: Parâmetros Calibrados para as Sub-Bacias.....	51
Tabela 11: Parâmetros Calibrados para os Trechos.....	52
Tabela 12: Valores de NSE e $R^2$ para os Eventos de 2005, 2011, 2016 e 2017.....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
API	Application Programming Interface
AR6	Sexto Relatório de Avaliação
BH-ALPA	Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema
CBH-ALPA	Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto
CN	Curve Number
COPDEM	Copernicus GLO-30 Digital Elevation Model
GEE	Gases de Efeito Estufa
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
IDW	Inverse Distance Weighting
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
LiDAR	Light Detection and Ranging
MDT	Modelo Digital de Terreno
NSE	Coefficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe
ONU	Organização das Nações Unidas
PRF	Peak Rate Factor
R <sup>2</sup>	Coefficiente de Determinação
SCS	Soil Conservation Service
SIG	Sistema de Informações Geográficas
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
US	United States
USACE	US Army Corps of Engineers
WMO	World Meteorological Organization

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da Bacia
$A_s$	Área da Sub-Bacia s
D	Declividade do Canal Principal
$I_a$	Abstração Inicial
K	Tempo de Deslocamento
L	Comprimento do Trecho
M	Armazenamento no Trecho
P	Precipitação Total
Q	Escoamento Superficial
$Q_p$	Pico de Vazão
$Q_{b,m}$	Vazão Média no Mês m
$Q_{b,s,m}$	Vazão de Base da Sub-Bacia s no Mês m
$q_{b,m}$	Vazão Específica de Base no Mês m
S	Capacidade Máxima de Retenção
$T_p$	Tempo de Pico Total do Hidrograma Unitário
$t_c$	Tempo de Concentração
$t_p$	Tempo de Pico
$t_r$	Duração da Chuva Efetiva, ou Passo de Tempo Computacional
$V_e$	Vazão de Entrada
$V_s$	Vazão de Saída
X	Coefficiente de Peso
$\Delta t$	Intervalo de Tempo

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução.....</b>	<b>15</b>
<b>2. Objetivos.....</b>	<b>17</b>
2.1. Objetivo Geral.....	17
2.2. Objetivos Específicos.....	17
<b>3. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>17</b>
3.1. Bacia Hidrográfica.....	17
3.1.1. Divisão Hidrográfica do Brasil e do Estado de São Paulo.....	18
3.1.2. Bacia Hidrográfica do Alto Paranapenama.....	20
3.2. Monitoramento de Vazões.....	21
3.3. Modelagem Hidrológica.....	22
3.3.1. Classificação, Histórico e Definição dos Modelos Hidrológicos.....	22
3.3.2. Principais Aplicações dos Modelos Hidrológicos.....	24
3.3.3. Calibração dos Modelos Hidrológicos.....	25
3.3.4. Modelo Hidrológico HEC-HMS.....	26
<b>4. Metodologia.....</b>	<b>27</b>
4.1. Área de Estudo.....	27
4.2. Modelo Digital de Terreno.....	29
4.3. Características Fisiográficas da Bacia Hidrográfica.....	30
4.4. Parâmetros Hidrológicos.....	31
4.4.1. <i>Loss: SCS Curve Number</i> .....	31
4.4.2. <i>Transform: SCS Unit Hydrograph</i> .....	32
4.4.3. <i>Baseflow: Constant Monthly</i> .....	34
4.4.4. <i>Routing: Muskingum</i> .....	34
4.5. Dados Pluviométricos.....	35
4.6. Dados Fluviométricos.....	36
4.7. Simulação, Calibração e Validação do Modelo Hidrológico.....	37
<b>5. Resultados e Discussão.....</b>	<b>40</b>
5.1. Características Fisiográficas da Bacia Hidrográfica.....	40
5.2. <i>Loss: SCS Curve Number</i> .....	42
5.3. <i>Transform: SCS Unit Hydrograph</i> .....	44
5.4. <i>Baseflow: Constant Monthly</i> .....	46
5.5. <i>Routing: Muskingum</i> .....	46
5.6. Resultados, Calibração e Validação do Modelo.....	47
<b>6. Considerações Finais.....</b>	<b>60</b>
<b>Referências.....</b>	<b>62</b>

## Introdução

O aquecimento global deve ultrapassar a marca de 1,5 °C até 2040. Essa é a perspectiva apresentada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (conhecido pelo acrônimo IPCC, do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*) em seu Sexto Relatório de Avaliação (AR6). Dos cenários de emissões analisados pelo AR6, apenas um oferece à humanidade uma chance de chegar ao fim do século com um aumento de temperatura abaixo de 1,5 °C, limite considerado o objetivo do Acordo de Paris. Esse cenário exige uma redução de 43% nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) até 2030 e a conquista de emissões líquidas zero de CO<sub>2</sub> até o início da década de 2050. Contudo, mesmo com a consciência sobre a gravidade do problema e a urgência da ação, a média anual das emissões de GEE entre 2010 a 2019 foi maior do que em qualquer década anteriormente registrada. As estimativas mostram que as emissões líquidas globais de GEE em 2019 foram 12% maiores do que em 2010 e 54% a mais do que em 1990 (IPCC, 2023a).

Segundo o AR6, a temperatura da superfície global foi 1,09 °C mais alta no período de 2011 a 2020 do que em comparação ao período de 1850 a 1900. É provável<sup>1</sup> que as atividades humanas sejam responsáveis por um aumento total de 1,07 °C. Além disso, o IPCC conclui que a temperatura aumentou mais rapidamente entre 1970 e 2020 do que em qualquer outro período de 50 anos nos últimos 2000 anos. E cada aumento adicional no aquecimento global provoca mudanças significativas nos eventos extremos. Mesmo com o aumento da temperatura da superfície global limitado em 1,5 °C, eventos extremos históricos deverão ocorrer (IPCC, 2023a). O item 4.3 “*Riscos no Curto Prazo*” do Relatório Síntese do AR6, em sua versão traduzida pelo Governo do Brasil e Pacto Global da ONU no Brasil, diz:

Muitas mudanças no sistema climático, incluindo eventos extremos, se tornarão maiores a curto prazo com o aumento do aquecimento global (alta confiança<sup>1</sup>). Múltiplos riscos climáticos e não climáticos irão interagir, resultando no aumento dos impactos compostos e em cascata, tornando-se mais difícil de gerenciar (alta confiança<sup>1</sup>). Perdas e danos aumentarão com o aumento do aquecimento global (muito alta confiança<sup>1</sup>), enquanto fortemente concentrados entre as populações vulneráveis mais pobres (alta confiança<sup>1</sup>). A continuidade dos atuais padrões insustentáveis de desenvolvimento aumentaria a exposição e a vulnerabilidade dos ecossistemas e das pessoas às ameaças climáticas (alta confiança<sup>1</sup>) (IPCC, 2023b).

Essa projeção, no entanto, já pode ser considerada realidade. De acordo com o Atlas da Mortalidade e Perdas Econômicas por Extremos Meteorológicos, Climáticos e Hídricos (do título em inglês, *Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes*), entre os anos de 1970 e 2019, o número de desastres quintuplicou. Foram

---

<sup>1</sup> A linguagem estatística do IPCC é um conjunto de termos padronizados para comunicar incertezas e confiança. O termo "provável" refere-se a uma probabilidade entre 66% e 90%, enquanto "alta confiança" e "muito alta confiança" correspondem a 8 em 10 chances e 9 em 10 chances, respectivamente.

mais de 11 mil desastres naturais registrados globalmente, causando mais de 2 milhões de mortes e perdas econômicas que chegam a US\$ 3,6 trilhões. Isso significa que, todos os dias, um desastre relacionado a extremos meteorológicos, climáticos ou hídricos ocorreu ao longo dos 50 anos, matando 115 pessoas e causando perdas diárias de US\$ 202 milhões. O Brasil lidera o *ranking* de perdas econômicas na América do Sul, com danos de US\$ 41,7 bilhões. Ainda, do total de mortes, 91% ocorreram em países em desenvolvimento (WMO, 2021). Segundo o Atlas Digital de Desastres no Brasil, o país registrou, entre 1991 e 2023, cerca de 5,1 mil óbitos, 9,6 milhões de desalojados e desabrigados, 1,5 milhões de feridos e enfermos, além de 232,6 milhões de afetados por desastres. Os danos materiais e prejuízos públicos e privados somam, ao todo, mais de R\$ 702 bilhões (Brasil, 2023).

Considerando todos os desastres relatados no Atlas, 44% estão associados a inundações. Na América do Sul, esse número sobe para 59% (WMO, 2021). No Brasil, as inundações também representam o desastre de maior ocorrência no país (EM-DAT, 2024). Esses eventos causaram, entre 1991 e 2023, um total de R\$ 70,6 bilhões em perdas econômicas, além de 644 óbitos, 3,9 milhões de desalojados e desabrigados, 429,8 mil feridos e enfermos e 21,9 milhões de afetados (Brasil, 2023). Isso ressalta a urgência de uma gestão eficaz e uma compreensão mais aprofundada dos recursos hídricos. Nesse contexto, a modelagem hidrológica é uma ferramenta essencial, permitindo prever e mitigar os impactos de eventos extremos. Além de fornecer previsões quantitativas sobre o comportamento dos sistemas hídricos, a modelagem hidrológica auxilia na elaboração de estratégias de gerenciamento de bacias hidrográficas, na implementação de medidas de adaptação às mudanças climáticas e na minimização dos riscos associados a desastres naturais.

No cenário brasileiro, onde as inundações são os desastres naturais mais frequentes, o uso de modelos hidrológicos é vital para o desenvolvimento de sistemas de alerta precoce. No entanto, apesar dos avanços tecnológicos significativos desses modelos, vários desafios persistem, incluindo a disponibilidade e qualidade dos dados. Observa-se que a gestão sustentável dos recursos hídricos é dificultada pela baixa maturidade das redes de monitoramento hidrológico globais e, principalmente, de países em desenvolvimento (Buytaert *et al.*, 2014; Kidd *et al.*, 2017; Pereira; Barbieiro; Quevedo, 2020).

Sabendo disso, o presente estudo visa aplicar o modelo hidrológico *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) na bacia hidrográfica do Alto Paranapanema, na área de contribuição da confluência dos rios Itapetininga e Paranapanema, no sudoeste do Estado de São Paulo. A escolha da área de estudo se justifica pela sua suscetibilidade a inundações, com eventos conhecidos nos anos de 1983, 1990, 1991,

1997, 1998, 2004 e 2016, afetando áreas dos municípios de Buri e Campina do Monte Alegre (Cilto *et al.*, 2023; Galvão *et al.*, 2023).

## **2. Objetivos**

### *2.1. Objetivo Geral*

Realizar a modelagem dos processos hidrológicos na bacia de contribuição da confluência dos rios Itapetininga e Paranapanema, a fim de compreender a dinâmica hidrológica da região e auxiliar na gestão de riscos relacionados a inundações.

### *2.2. Objetivos Específicos*

- Determinar os parâmetros hidrológicos relevantes para o modelo, como Curve Number, tempo de pico e vazão de base, a partir de dados teóricos e observados;
- Realizar a simulação, calibração e validação do modelo hidrológico HEC-HMS;
- Analisar a resposta hidrológica da bacia durante eventos extremos e períodos sem inundações, identificando limitações e possíveis ajustes no modelo;
- Avaliar a aplicabilidade do modelo em simular vazões.

## **3. Revisão Bibliográfica**

### *3.1. Bacia Hidrográfica*

A bacia hidrográfica é uma área delimitada naturalmente que coleta a água das precipitações e direciona o escoamento para um único ponto de saída, chamado de exutório. Essa área é composta por superfícies de vertentes, que são as encostas do terreno, e por uma rede de drenagem integrada, formada por cursos d'água que se conectam progressivamente até convergirem em um único canal principal no exutório (Tucci, 2001).

De acordo com Collischonn e Dornelles (2015), a bacia hidrográfica pode ser entendida como um sistema físico dinâmico que opera transformando entradas de água, como a precipitação, em saídas de água, como o escoamento e a evapotranspiração. Este sistema age como um filtro temporal, convertendo um evento concentrado no tempo em saídas mais distribuídas e espaçadas, como o escoamento que alimenta os corpos d'água.

Quando a precipitação atinge as vertentes de uma bacia hidrográfica, parte da água infiltra-se no solo até que este atinja o ponto de saturação. Após esse limite, as taxas de infiltração diminuem, e o escoamento superficial começa a aumentar progressivamente. Nesse contexto, as vertentes atuam como áreas produtoras de água para o escoamento. Assim, a água é direcionada à rede de drenagem, que a transporta para o exutório (Tucci, 2001).

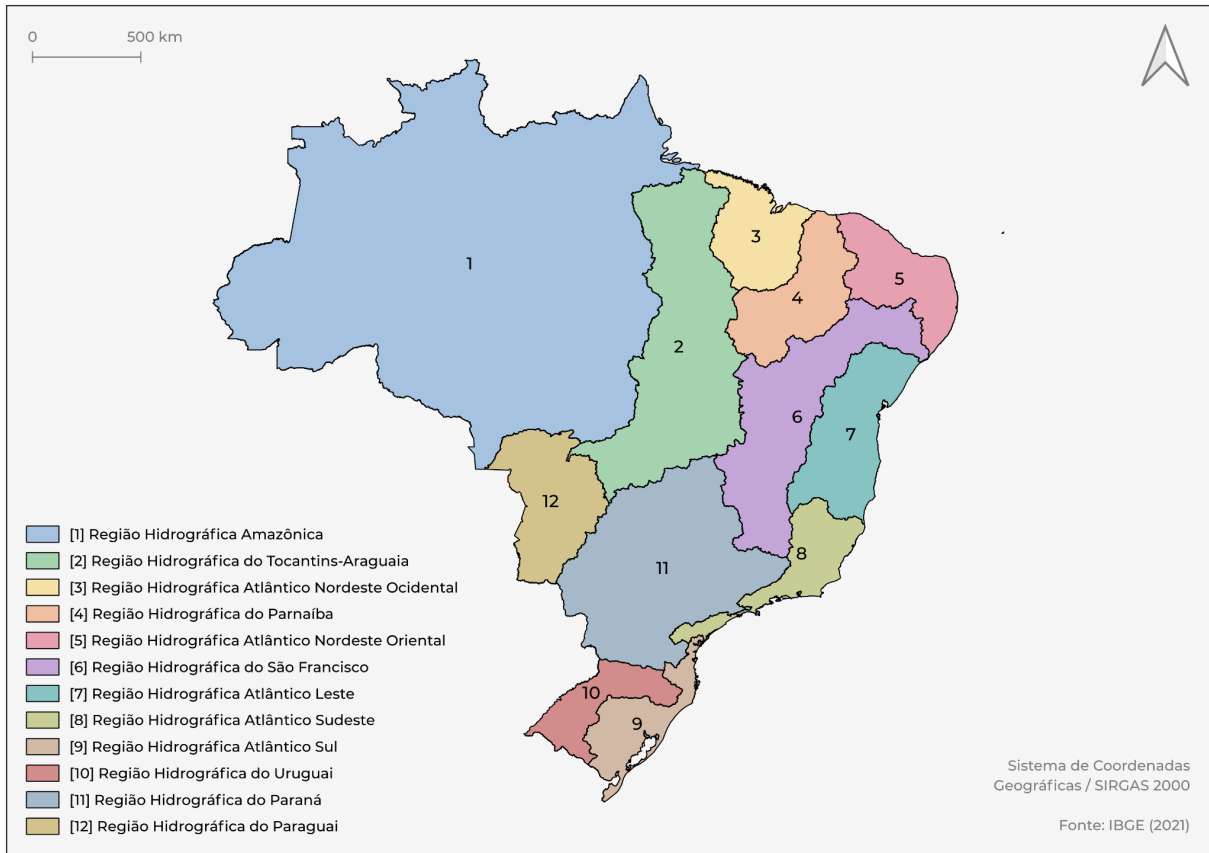
A interação entre a chuva e a bacia hidrográfica é influenciada por diversos fatores naturais e físicos. Entre os mais importantes estão o clima, os solos, as rochas do subsolo e a vegetação (Horton, 1932 *apud* Collischonn e Dornelles, 2015). Outro aspecto crucial são os fatores morfométricos, que descrevem a forma física da bacia e seu impacto no comportamento hidrológico. Esses fatores incluem, por exemplo, a área de drenagem, o comprimento do curso d'água principal e a declividade (Collischonn e Dornelles, 2015).

É exatamente no território conhecido como bacia hidrográfica que as atividades humanas são desenvolvidas. A Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, conhecida como a Política Nacional de Recursos Hídricos, transformou a forma como os recursos hídricos são geridos no Brasil, estabelecendo as bacias hidrográficas como unidades estratégicas de planejamento e gestão. Essa abordagem territorial permite que a administração e o planejamento considerem as características e necessidades específicas de cada bacia, respeitando a integração dos processos naturais e das atividades humanas que nela ocorrem. As bacias hidrográficas abrangem todos os tipos de usos do território, como áreas urbanas, industriais, agrícolas e de preservação ambiental. Todos os processos decorrentes dessas atividades impactam direta ou indiretamente o sistema hidrológico da bacia, sendo refletidos de forma integrada no exutório. Assim, o que ocorre no ponto de saída de uma bacia é o resultado acumulado das formas de ocupação do solo, das práticas de manejo e da utilização dos recursos hídricos ao longo de toda a bacia (Porto e Porto, 2008).

### *3.1.1. Divisão Hidrográfica do Brasil e do Estado de São Paulo*

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos, através da Resolução Nº 32, de 15 de outubro de 2003, instituiu a Divisão Hidrográfica Nacional, um primeiro nível de macrodivisão hidrográfica, que dividiu o país nas chamadas Regiões Hidrográficas Brasileiras, conforme mostrado na Figura 1. A divisão dessas unidades hidrográficas brasileiras considera as características únicas de cada território, refletindo as diversas condições ambientais, econômicas, sociais e culturais presentes na região.

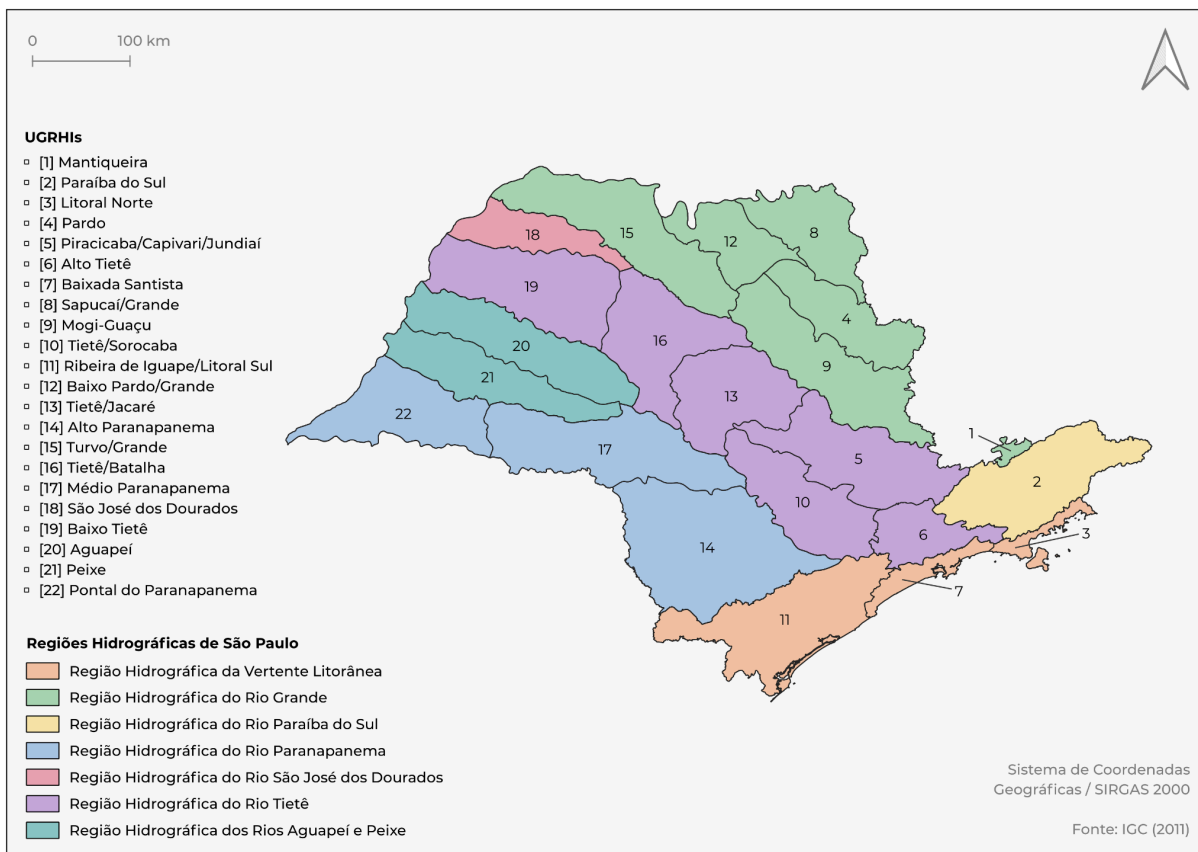
**Figura 1: Divisão Hidrográfica Nacional**



Fonte: Autoria própria (2025)

O Estado de São Paulo, por sua vez, instituiu 22 unidades hidrográficas denominadas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHIs), conforme previsto na Lei Nº 16.337, de 14 de dezembro de 2016. Ainda, o Plano Estadual de Recursos Hídricos 2004-2007 estabeleceu sete regiões hidrográficas estaduais, visto a necessidade de criar regiões que integrassem a totalidade das bacias, para não desvincular os impactos de montante e jusante, além de promover o diálogo entre as UGRHIs do mesmo sistema hídrico. Observa-se as divisões hidrográficas do Estado de São Paulo na Figura 2.

**Figura 2: Divisão Hidrográfica do Estado de São Paulo**



Fonte: Autoria própria (2025)

### 3.1.2. Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema

Entre as bacias hidrográficas do estado de São Paulo, está a Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema (BH-ALPA), oficialmente reconhecida como Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos N° 14 – UGRHI 14 (Figura 2). Localizada no sudoeste paulista, trata-se da maior bacia hidrográfica do estado, abrangendo uma área de drenagem de 22.689 km<sup>2</sup>, o que corresponde a 9,1% da área total do estado, e abrigoando uma população estimada em cerca de 761 mil habitantes (CBH-ALPA, 2023). A região apresenta, ainda, uma baixa densidade demográfica, com aproximadamente 37,05 habitantes por quilômetro quadrado.

A BH-ALPA engloba os municípios de Angatuba, Arandu, Barão de Antonina, Bernardino de Campos, Bom Sucesso de Itararé, Buri, Campina do Monte Alegre, Capão Bonito, Cerqueira César, Coronel Macedo, Fartura, Guapiara, Guareí, Ipaussu, Itaberá, Itai, Itapetininga, Itapeva, Itaporanga, Itararé, Itatinga, Manduri, Nova Campina, Paranapanema, Pilar do Sul, Piraju, Ribeirão Branco, Ribeirão Grande, Riversul, São Miguel Arcanjo, Sarutaiá, Taguaí, Taquarituba, Taquarivaí, Tejupá e Timburi. Os principais rios que compõem

a bacia incluem os rios Apiaí-Açu, das Almas, Guareí, Itapetininga, Itararé, Jacu, Paranapanema, Paranapitanga, Santo Inácio, Taquari e Turvo.

Apesar de representar uma das maiores áreas de cobertura vegetal natural do estado de São Paulo, apenas 25% da área da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema, equivalente a 4.677 km<sup>2</sup>, ainda conserva vegetação natural remanescente (CBH-ALPA, 2023). Esse valor corresponde a 9,8% da cobertura vegetal natural do estado, totalizando aproximadamente 338 mil hectares, compostos por fragmentos de Mata Atlântica e Cerrado. A bacia apresenta uma paisagem diversificada, composta por pastagens, culturas agrícolas perenes e temporárias, campos, matas, cerrado, áreas de transição e reflorestamento. Além de ser uma região de destaque na atividade agrícola, a BH-ALPA desempenha um papel importante na geração de energia hidrelétrica. O principal curso d'água da bacia, o Rio Paranapanema, abriga 11 usinas hidrelétricas, com uma capacidade de produção total de 2,4 GW (Hucke *et al.*, 2024).

O clima da BH-ALPA é classificado como tropical úmido, conforme a classificação climática de Köppen, identificado como Cwa. Esse clima é caracterizado por altas temperaturas e precipitações, com uma média anual de temperatura de 19°C e precipitação média de 1.200 mm. A geomorfologia da bacia é composta predominantemente por duas unidades morfoestruturais: o Cinturão Orogênico do Atlântico, localizado a leste, e a Bacia Sedimentar do Paraná, que ocupa a maior parte do território. Essa configuração resulta em formas de relevo diversificadas, como morros baixos, planaltos, vales e depressões. Quanto aos tipos de solo, a bacia apresenta uma variedade que inclui os solos do tipo B textural, B latossólico, hidromórficos e solos pouco desenvolvidos, refletindo as características ambientais e geológicas da região (CBH-ALPA, 2016).

### 3.2. Monitoramento de Vazões

A vazão corresponde ao volume de água que atravessa uma seção específica de um rio durante um intervalo de tempo. Quando o volume é medido em litros e o tempo em segundos, a vazão é representada em litros por segundo (L/s). No entanto, para rios, é mais comum expressar a vazão em metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s), onde cada 1 m<sup>3</sup>/s equivale a 1000 L/s. A medição de vazões é fundamental para avaliar a disponibilidade hídrica em um determinado local, considerando os diferentes usos da água. Além disso, é essencial monitorar vazões em situações extremas, como inundações, para planejar estruturas hidráulicas e ações que minimizem os danos causados por estes eventos (Collischonn e Dornelles, 2015).

Essas medições, no entanto, apresentam desafios, pois são realizadas em ambientes naturais, onde as variáveis não podem ser totalmente controladas. Na hidrologia, estimar a

vazão dos rios com precisão é uma tarefa complexa. Isso ocorre devido à variabilidade climática, que faz com que as vazões mudem ao longo do tempo. Além disso, a heterogeneidade das bacias hidrográficas, considerando fatores como solos, litologia e relevo, provoca variações espaciais na vazão, tanto em diferentes trechos de um mesmo rio quanto em rios distintos dentro da mesma bacia hidrográfica (Collischonn *et al.*, 2023).

Para tratar a variabilidade da vazão ao longo do tempo, é comum utilizar as chamadas vazões de referência. Estas correspondem a valores representativos que sintetizam um grande volume de dados obtidos ao longo de uma série histórica de medições em um determinado ponto (Cruz e Tucci, 2008 *apud* Collischonn *et al.*, 2023). Em cenários extremos, as vazões de referência podem ser utilizadas para descrever situações críticas, como períodos de escassez hídrica, ou para representar condições de cheia, ajudando a compreender a disponibilidade de água e os riscos associados em cada caso (Collischonn *et al.*, 2023).

A estimativa de vazões de referência constitui uma necessidade crítica em áreas com ausência ou escassez de dados hidrológicos, realidade comum em projetos de gestão de recursos hídricos (Collischonn *et al.*, 2023). Nesse contexto, os modelos hidrológicos emergem como ferramentas essenciais, pois permitem simular processos, superando limitações operacionais e econômicas associadas à coleta de dados em campo (Marinho Filho *et al.*, 2012). O modelo MGB-IPH, por exemplo, foi utilizado na bacia do Alto Teles Pires para simular vazões diárias e projetar cenários de mudanças climáticas, enquanto o SWAT auxiliou na avaliação de políticas de preservação de matas ciliares no Rio Jaguari/RS (Oliveira *et al.*, 2016; Dotto; Robaina; Trentin, 2024). Esses casos demonstram como a modelagem subsidia decisões técnicas mesmo em condições de dados limitados, consolidando-se como uma ferramenta à gestão sustentável de bacias hidrográficas.

### *3.3. Modelagem Hidrológica*

#### *3.3.1. Classificação, Histórico e Definição dos Modelos Hidrológicos*

Os modelos hidrológicos foram desenvolvidos para atender à demanda por séries históricas de vazões mais longas e representativas, essenciais para o planejamento e execução de projetos de recursos hídricos. Em geral, as séries de precipitação costumam ser mais extensas do que as de vazão. Além disso, modificações nas bacias hidrográficas, como a construção de obras hidráulicas e mudanças no uso do solo, comprometem a homogeneidade e a estacionariedade das séries de vazão. Utilizando dados de precipitação e outras variáveis e características, esses modelos permitem estimar vazões desconhecidas, ajustando-se aos novos cenários observados ou projetados para as bacias hidrográficas (Tucci, 2005).

Moreira (2005) elenca que os modelos hidrológicos podem ser classificados de diversas maneiras, dependendo de suas características (Tabela 1). No geral, a classificação considera: o tipo de variáveis empregadas (estocásticos ou determinísticos), a natureza das relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a inclusão de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a dependência em relação ao tempo (estacionários ou dinâmicos).

**Tabela 1: Tipos de Modelos Hidrológicos**

<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
Estocásticos	Consideram ao menos uma variável aleatória, incorporando comportamento probabilístico
Determinísticos	Não utilizam probabilidade; cada entrada produz uma saída única, mesmo que a entrada seja aleatória
Empíricos	Baseados em observações; simples e específicos para uma região, mas pouco robustos para condições não previstas
Conceituais	Baseados em processos; descrevem fenômenos detalhadamente, exigindo mais dados e parametrização
Discretos	Representam fenômenos contínuos em intervalos específicos; maior precisão com menor passo temporal, mas com maior custo computacional
Contínuos	Descrevem fenômenos sem intervalos definidos no tempo, representando variáveis que mudam continuamente
Concentrados	Supõem que variáveis de entrada e saída representam toda a área de estudo uniformemente
Distribuídos	Consideram variabilidade espacial, discretizando o espaço e incluindo relações entre elementos vizinhos
Estacionários	Os parâmetros não mudam com o tempo, descrevendo o fenômeno em um momento específico
Dinâmicos	Permitem variação temporal dos parâmetros, tornando as variáveis dependentes do tempo

Fonte: Adaptado de Moreira (2005)

De acordo com Tucci (2005), até a década de 1950, os métodos utilizados eram predominantemente baseados em indicadores estatísticos dos processos, com um foco maior no desenvolvimento de modelos empíricos, que representavam os fenômenos hidrológicos sem considerar os processos físicos subjacentes. Após esse período, surgiram os primeiros modelos hidrológicos, principalmente do tipo chuva-vazão, que buscavam prever os efeitos da precipitação sobre uma bacia, gerando hidrogramas para o exutório. Esses modelos eram, em sua maioria, concentrados, determinísticos e semi-conceituais. Por sua vez, Fayal (2008) aponta que esses avanços ocorreram quando as agências governamentais passaram a

implementar seus próprios programas de pesquisas hidrológicas, a partir da década de 1930. Conforme o mesmo autor, a evolução dos modelos hidrológicos ocorreu em duas direções: de um lado, o desenvolvimento de modelos que representam os processos hidrológicos com maior precisão e de maneira distribuída; e, de outro, a criação de modelos que abordam, de forma empírica, a distribuição dos parâmetros em áreas de grande extensão.

Como proposto por Tucci (2005), um modelo de simulação, de forma geral, é uma representação matemática de um sistema. Ele descreve o comportamento de uma estrutura, processo ou esquema, seja real ou abstrato, ao longo de um intervalo de tempo. O modelo estabelece relações entre uma entrada (como um estímulo, energia ou informação) e uma saída (como um efeito ou resposta correspondente). Nesse sentido, segundo o mesmo autor, um modelo hidrológico é uma ferramenta usada para simular os processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica e prever as consequências de diferentes eventos com base em valores observados. Esses modelos auxiliam engenheiros hidrólogos e outros profissionais da área, proporcionando uma melhor compreensão dos fenômenos hidrológicos e permitindo a previsão do comportamento da bacia sob diferentes condições (Lima, 2011). No entanto, a maioria dos modelos representa apenas uma parte dos processos naturais de uma bacia, devido à complexidade de traduzir esses fenômenos em equações matemáticas.

### *3.3.2. Principais Aplicações dos Modelos Hidrológicos*

Os modelos hidrológicos são fundamentais para a previsão e quantificação dos fenômenos físicos naturais, uma vez que, embora seja possível, medir diretamente esses processos, é logisticamente difícil e economicamente inviável quando realizado em larga escala. Assim, esses modelos se tornam ferramentas essenciais para preencher lacunas de informações cruciais no planejamento e gestão de recursos hídricos. Lou (2010) apresenta os seguintes usos como as principais aplicações dos modelos hidrológicos:

- Compreensão do comportamento hidrológico no exutório: O uso de modelos detalhados possibilita isolar e analisar os diversos processos que ocorrem na bacia. Isso facilita o estudo da sensibilidade das variações em bacias com características distintas. Além disso, os modelos permitem testar e comparar diferentes formulações para descrever os processos hidrológicos, contribuindo para um entendimento mais preciso.

- Análise de consistência e preenchimento de falhas: Devido ao menor custo e maior disponibilidade, as séries históricas de precipitação geralmente são mais longas do que as de vazão. Assim, os modelos hidrológicos permitem, após ajustes adequados, estender as séries de vazão com base nos dados de precipitação. Além disso, esses modelos são utilizados para

verificar a consistência de curvas-chave, níveis d'água e precipitações observadas, bem como para identificar possíveis alterações no rio e na bacia hidrográfica.

- Previsão de vazão: A antecipação das vazões é essencial para atividades como controle de cheias, operação de obras hidráulicas e navegação. Essas estimativas podem ser feitas a partir de dados de precipitação, vazões de postos a montante ou pela combinação desses fatores. Embora os objetivos de previsão diferenciem-se de outras simulações, modelos semelhantes podem ser empregados, desde que com adaptações nas estruturas computacionais. Para previsões em tempo real, o modelo deve integrar o máximo de informações disponíveis no momento, ajustando continuamente parâmetros e variáveis.

- Dimensionamento e previsão de cenários de planejamento: Com base na precipitação conhecida e no risco de sua ocorrência, é possível estimar a vazão resultante em diferentes cenários de uso e modificação da bacia. Isso é fundamental para o dimensionamento e planejamento de alternativas de desenvolvimento do sistema. No entanto, os modelos hidrológicos podem apresentar limitações ao simular cenários de desenvolvimento que difiram do ambiente utilizado no ajuste do modelo, como mudanças no uso do solo.

- Efeitos da modificação do uso do solo: A análise do escoamento resultante de mudanças no uso do solo é um problema complexo, que exige metodologias mais avançadas do que aquelas utilizadas para os problemas anteriores. Embora os modelos existentes sejam em sua maioria conceituais, eles frequentemente empregam formulações empíricas para representar os processos, resultando em parâmetros que têm uma relação mais qualitativa do que quantitativa com a física da bacia. Mesmo assim, esses parâmetros englobam diversas características da bacia, o que torna difícil analisar os impactos de modificações em qualquer aspecto da bacia. Exemplos disso incluem desmatamento em grandes áreas e urbanização acelerada. Modelos que tentam representar os processos físicos com mais detalhes e menor empirismo ainda enfrentam limitações devido à heterogeneidade das bacias.

### *3.3.3 Calibração dos Modelos Hidrológicos*

Conforme colocado por Moreira (2005), uma das etapas fundamentais na aplicação dos modelos hidrológicos é a calibração, que tem como objetivo determinar os valores dos parâmetros do modelo. Esse processo pode ser realizado por tentativa e erro ou de forma automática. No método de tentativa e erro, o usuário testa diferentes combinações de parâmetros e continua o processo até encontrar um vetor de parâmetros que, quando aplicado no modelo, represente a resposta natural da bacia à precipitação observada.

Já no método automático, a busca por um vetor adequado de parâmetros é realizada por meio de técnicas matemáticas de otimização. A otimização ocorre ao minimizar (ou maximizar) uma função objetivo, que mede a diferença entre as séries de vazão observada e a simulada. A função objetivo representa matematicamente essa diferença, e a calibração visa encontrar um vetor de parâmetros que minimize esse erro. A cada iteração, o algoritmo calcula um novo valor para a função objetivo, compara-o com o valor anterior e segue em direção ao ponto ótimo, até que o processo iterativo seja concluído (Moreira, 2005).

#### 3.3.4. Modelo Hidrológico HEC-HMS

Uma das ferramentas utilizadas para modelagem hidrológica, é o *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), um produto do *US Army Corps of Engineers* (USACE), desenvolvido para simular os processos hidrológicos completos em sistemas de bacias hidrográficas. O *software* integra diversos procedimentos tradicionais de análise hidrológica, como infiltração durante eventos e aplicação de hidrogramas unitários. Além disso, o HEC-HMS oferece funcionalidades específicas para simulação contínua, incluindo evapotranspiração, derretimento de neve e balanço de umidade do solo. Ferramentas complementares ampliam suas aplicações, permitindo a otimização de modelos, previsão de vazão, redução de profundidade-área, avaliação de incertezas, além de análises de erosão, transporte de sedimentos e qualidade da água (USACE, 2024).

O modelo permite a construção de modelos chuva-vazão em bacias hidrográficas, gerando hidrogramas de saída e fornecendo informações cruciais como o volume de deflúvio, vazão de pico e tempo de escoamento. A partir desses hidrogramas, é possível inferir a resposta de um rio a eventos de precipitação com intensidade e frequência conhecidas. Uma das principais aplicações desse tipo de modelo hidrológico é a previsão de vazões decorrentes de eventos específicos de precipitação. Essa capacidade é essencial para o controle de cheias, pois permite realizar previsões em tempo real e avaliar diferentes cenários de uso da bacia, auxiliando no planejamento e mitigação de impactos hidrológicos (Tucci, 2005).

O HEC-HMS pode ser classificado como majoritariamente discreto, principalmente concentrado, empírico/conceitual, determinístico e estacionário/dinâmico. Essa categorização multifacetada, conforme detalhado no manual técnico do HEC-HMS, reflete sua estrutura operacional e aplicabilidade prática. Como modelo discreto, simula predominantemente eventos isolados de precipitação (tempestades de curta duração), ignorando processos entre eventos como a redistribuição de umidade no solo, exceto em módulos específicos (p. ex., *Soil Moisture Accounting*). Quanto à abordagem espacial, é concentrado, utilizando

parâmetros médios por sub-bacias e desconsiderando variações geográficas internas, o que o distingue de modelos distribuídos baseados em células de grade. Na dimensão metodológica, combina características empíricas (p. ex., método SCS Curve Number) e conceituais (p. ex., modelo Green-Ampt). Sua natureza determinística pressupõe relações fixas entre entrada (precipitação) e saída (vazão), tratando parâmetros como valores estáticos por cenário. Finalmente, a classificação entre estacionário ou dinâmico engloba tanto parâmetros estacionários (p. ex., propriedades do solo) quanto dinâmicos (p. ex., coeficientes calibrados em dados históricos), permitindo flexibilidade operacional (USACE, 2025).

## **4. Metodologia**

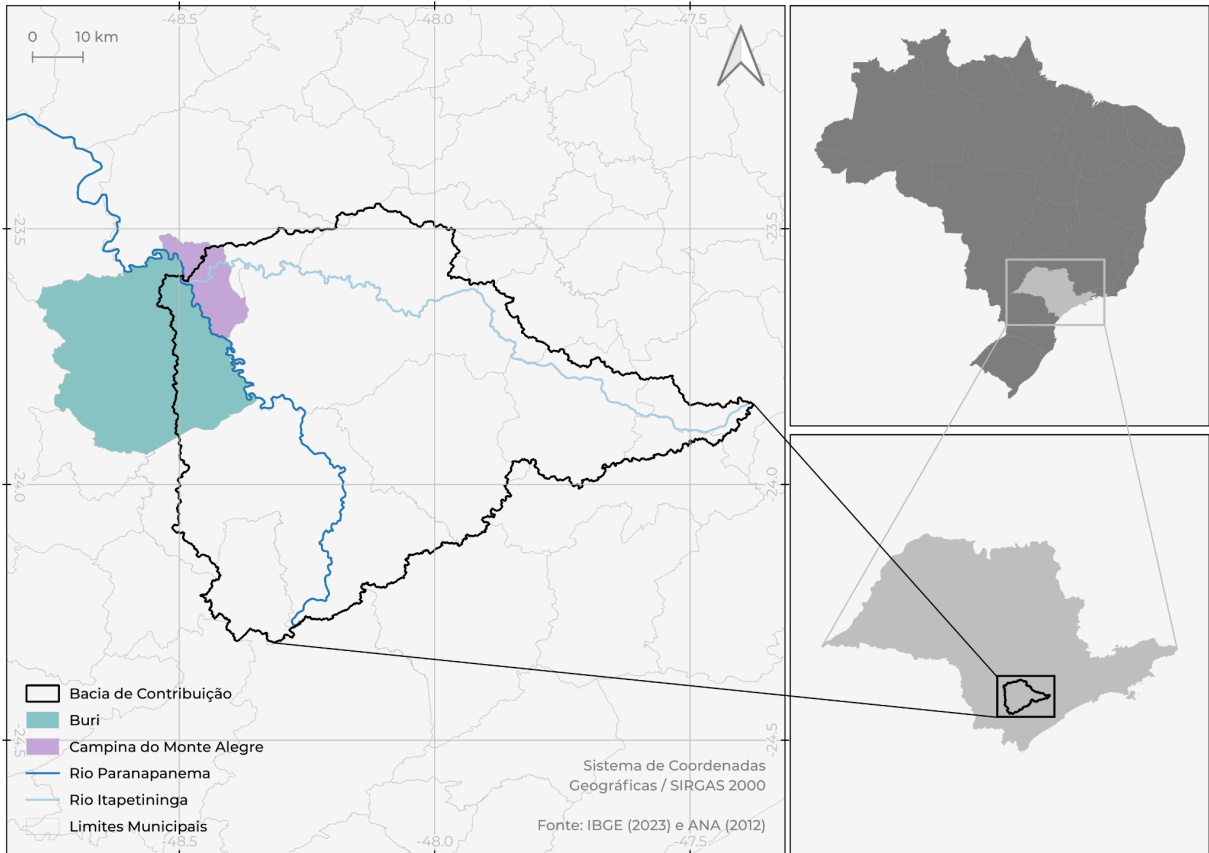
### *4.1. Área de Estudo*

Este trabalho foi desenvolvido na bacia de contribuição da confluência dos rios Itapetininga e Paranapanema (Figura 3). A escolha desta região se justifica pela suscetibilidade a inundações, um fenômeno recorrente que tem causado impactos sociais, econômicos e ambientais significativos em Buri e Campina do Monte Alegre. Historicamente, estes municípios foram atingidos por eventos de inundação em diversos anos, com destaque para 1983, 1990, 1991, 1997, 1998, 2004 e 2016 (Cilto *et al.*, 2023; Galvão *et al.*, 2023).

Os eventos de inundação relatados na região variaram em magnitude e impacto conforme a natureza das chuvas (Tabela 2). O evento de 2004, por exemplo, foi marcado por precipitações intensas e concentradas (321,1 mm em 8 dias), resultando na maior cota de inundação registrada (584,41 m). A inundação de 1990, por sua vez, apesar de apresentar a menor precipitação, teve a maior concentração entre os eventos (111,4 mm em 4 dias).

Em seu estudo, Santos (2023) analisou a região da confluência dos rios e identificou que, durante a inundação de 2004, a área alagada atingiu uma extensão de 14,7 km<sup>2</sup>. No evento de 2016, a cheia se estendeu mesmo após dias sem chuvas, com os bairros Prainha, Varjão do Engenheiro Ermílio, Saltinho e Tapiá, em Campina do Monte Alegre, sendo os mais afetados (G1, 2016a). Em alguns locais, só era possível ver os telhados das casas (G1, 2016b). Além disso, os impactos das inundações ainda são visíveis na região, com postes sinalizando os níveis atingidos pela água e residências exibindo marcas d'água (Figura 4).

**Figura 3: Localização da Bacia de Contribuição**



Fonte: Autoria própria (2025)

**Tabela 2: Precipitações Causadoras das Inundações Relatadas na Área de Estudo**

Ano	Primeiro dia de chuva	Último dia de chuva	Total de dias	Cota de inundação (m)	Precipitação acumulada média (mm)
1983	03/06	12/06	10	583,83	358,2
1989	25/07	31/07	7	-	231,7
1990	12/02	15/02	4	582,85	111,4
1991	07/12	28/12	22	582,62	215,5
1997	20/01	29/02	10	583,75	273,0
1998	21/02	03/03	14	583,49	275,6
2004	22/01	29/01	8	584,41	321,1
2016	09/01	14/01	6	583,38	194,3

Fonte: Adaptado de Cilto *et al.* (2023) e Galvão *et al.* (2023)

**Figura 4: Evidências das Inundações em Campina do Monte Alegre**



Fonte: Autoria própria

#### *4.2. Modelo Digital de Terreno*

O ANADEM é um modelo digital de terreno (MDT) desenvolvido especificamente para a América do Sul com o objetivo de corrigir a influência da vegetação do modelo digital de elevação Copernicus GLO-30 (COPDEM). Utilizado neste trabalho, é fruto de termo de cooperação entre o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Este MDT foi criado utilizando uma abordagem que integra dados de sensoriamento remoto, aprendizado de máquina e altimetria por LiDAR. O fluxo de trabalho do ANADEM foi estruturado para garantir a aplicabilidade em diferentes regiões da América do Sul. Ele incluiu

etapas como treinamento do modelo, correção do viés, pós-processamento e validação dos resultados utilizando dados independentes de elevação. O ANADEM reduziu em 85,6% o efeito da vegetação em relação ao COPDEM, além de apresentar resultados precisos em comparação com outros MDTs. A análise dos resultados mostrou que o ANADEM é particularmente eficiente em áreas com alta densidade de vegetação. Além disso, a representação do terreno também foi aprimorada, com melhor desempenho em termos de delineamento de bacias hidrográficas e redes de drenagem (Laipelt *et al.*, 2024).

Sendo assim, com uma resolução espacial de 30 metros, o ANADEM tem ampla aplicabilidade em estudos hidrológicos, modelagem de inundações, análises geomorfológicas e outras pesquisas que dependem de informações topográficas. Além disso, o ANADEM é de acesso aberto e gratuito, facilitando seu uso por pesquisadores, instituições públicas e privadas. O modelo e seus códigos estão disponíveis na plataforma GitHub, permitindo que outros usuários repliquem ou adaptem a metodologia conforme suas necessidades.

#### 4.3. Características Fisiográficas da Bacia Hidrográfica

A caracterização fisiográfica de uma bacia hidrográfica é fundamental para compreender os processos hidrológicos que nela ocorrem. Neste estudo, as características fisiográficas foram obtidas por meio do HEC-HMS, utilizando o ANADEM como fonte de dados topográficos. O ANADEM foi empregado em formato *raster*, com resolução espacial de 30 metros. A versão do HEC-HMS utilizada foi a 4.12, que oferece suporte para a importação e processamento direto de modelos digitais de terreno, facilitando a extração de dados e a análise da bacia com maior precisão e eficiência. Nas suas versões mais recentes, o HEC-HMS passou a integrar ferramentas de Sistema de Informações Geográficas (SIG), simplificando a realização de análises topológicas e espaciais. Essas ferramentas possibilitam a delimitação de sub-bacias e a obtenção de diversos parâmetros físicos da bacia.

Inicialmente, o sistema de coordenadas foi configurado como UTM Zone 22S, Datum WGS 84, utilizando a ferramenta *Coordinate System*, para garantir a projeção correta dos dados no software. Em seguida, o MDT foi carregado no HEC-HMS por meio do *Terrain Data Manager*, com a compatibilidade do arquivo sendo verificada para assegurar a correspondência com o sistema de coordenadas previamente definido. Na etapa seguinte, utilizou-se a ferramenta *Preprocess Sinks*, que eliminou as depressões espúrias presentes no MDT, garantindo uma representação precisa do fluxo hidrológico. Após essa etapa, o comando *Preprocess Drainage* foi aplicado para determinar a direção e a acumulação do fluxo, resultando em um mapa da rede de drenagem da bacia hidrográfica.

Com a rede de drenagem processada, utilizou-se a ferramenta *Identify Streams*, onde foi definida uma área mínima de contribuição de 150 km<sup>2</sup> como parâmetro para a identificação dos rios. Este valor foi escolhido considerando a escala da bacia hidrográfica e o nível de detalhamento desejado. Em seguida, foram aplicados *Break Points* para especificar o ponto exutório da bacia hidrográfica e localizar as estações meteorológicas dentro da área de estudo. Por fim, a ferramenta *Delineate Elements* foi utilizada para delimitar automaticamente os elementos da bacia, incluindo sub-bacias e canais principais, com base nos pontos e fluxos identificados. Com esse processo, também foi possível calcular as características fisiográficas da bacia hidrográfica de interesse, como área das sub-bacias, comprimento dos canais principais, declividade média dos canais, entre outros parâmetros.

#### 4.4. Parâmetros Hidrológicos

Os parâmetros hidrológicos são dados de entrada fundamentais no HEC-HMS, permitindo que o modelo represente os processos físicos e hidrológicos da bacia hidrográfica. Esses parâmetros são ajustados com base nas características fisiográficas da área de estudo e nos objetivos da simulação. No presente estudo, os métodos SCS Curve Number, SCS Unit Hydrograph, Constant Monthly e Muskingum foram utilizados, respectivamente, para modelar perdas (*Loss*), transformação chuva-vazão (*Transform*), fluxo de base (*Baseflow*) e propagação (*Routing*). Esses métodos foram escolhidos pela sua adequação às condições da bacia e pela simplicidade na parametrização, facilitando a integração das características locais ao modelo. A seguir, são descritos os procedimentos adotados para definir cada parâmetro.

##### 4.4.1. *Loss: SCS Curve Number*

Para representar as perdas iniciais e contínuas no modelo hidrológico, utilizou-se o método SCS Curve Number, amplamente reconhecido pela simplicidade e eficiência na modelagem de diferentes tipos de bacias hidrográficas. Os valores de Curve Number (CN) foram calculados para cada sub-bacia com base no processamento do produto BHO\_CN, disponibilizado pela ANA (2018). Os valores de CN nesse produto foram obtidos a partir da integração de dois conjuntos de dados principais. O primeiro foi o Mapa de Cobertura e Uso da Terra do Brasil de 2014. O segundo foi o Mapa Pedológico Multiescalas da ANA de 2017, uma base vetorial poligonal na escala de 1:250.000, derivada da integração de mapas pedológicos de diversas fontes, como IBGE, Embrapa e estaduais. As classes hidrológicas dos solos foram definidas de acordo com Sartori, Neto e Genovez (2005).

Inicialmente, os dados necessários foram obtidos da BHO\_CN, disponível no catálogo de metadados da ANA, e preparados para análise. No QGIS, versão 3.30.0, as sub-bacias delimitadas no HEC-HMS foram importadas como *shapefiles*, juntamente com a camada vetorial da BHO\_CN. As camadas foram reprojctadas para o sistema de coordenadas UTM Zone 22S, Datum WGS 84, garantindo a compatibilidade das análises espaciais.

A determinação do CN envolveu a interseção espacial das sub-bacias com a camada *raster* da Base Ottocodificada, permitindo associar cada célula *raster* à sub-bacia correspondente. O CN médio de cada sub-bacia foi calculado utilizando uma média ponderada, considerando o valor de CN de cada classe de uso do solo e sua área correspondente. Com os valores médios de CN para cada sub-bacia, foi possível calcular a capacidade máxima de retenção (S), em mm, cuja fórmula é dada pela Equação 1. O método SCS considera que a abstração inicial ( $I_a$ ), em mm, é equivalente a 20% de S (Equação 2).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (1)$$

$$I_a = 0,2 \times S \quad (2)$$

Além disso, para representar o escoamento superficial (Q), em mm, decorrente de uma precipitação total (P), em mm, utiliza-se a Equação 3.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (3)$$

#### 4.4.2. Transform: SCS Unit Hydrograph

Para a transformação da precipitação em escoamento superficial no modelo, utilizou-se o método SCS Unit Hydrograph, reconhecido por sua eficiência e simplicidade na representação do comportamento hidrológico em diferentes bacias hidrográficas. O cálculo do tempo de concentração ( $t_c$ ), em min, necessário para a aplicação do método, foi realizado empregando a fórmula de Watt & Chow, equação desenvolvida com base em bacias de até 5840 km<sup>2</sup>. Essa fórmula (Equação 4) leva em consideração o comprimento do curso d'água principal (L), em km, e a declividade do curso d'água principal (D), em m/m.

$$t_c = 7,68 \left( \frac{L}{D^{0,5}} \right)^{0,79} \quad (4)$$

A partir do tempo de concentração calculado, determinou-se o tempo de pico ( $t_p$ ), em min, também conhecido como *lag time*, que foi estimado como 60% do  $t_c$  (Equação 5).

$$t_p = 0,6 \times t_c \quad (5)$$

Além disso, para ajustar o modelo às características da bacia em estudo, alterou-se o *Peak Rate Factor* (PRF) para o valor de 100, como proposto por Cahyono e Adidarma (2019). Em seu trabalho, os autores propõem valores de PRF de acordo com a declividade da bacia hidrográfica (Tabela 3). Essa modificação reflete as condições hidrológicas locais, além de considerar a necessidade de uma resposta hidrológica mais realista, alinhada às especificidades do escoamento superficial na área analisada. Esses ajustes garantiram que a transformação chuva-vazão fosse representada com maior precisão no modelo.

**Tabela 3: Valores de *Peak Rate Factor***

Declividade (%)	PRF
0 - 1,5	100
1,5 - 4,5	200
4,5 - 10	300
10 - 20	400
20 - 25	500
> 25	600

Fonte: Cahyono e Adidarma (2019)

O tempo de pico total do hidrograma unitário ( $T_p$ ), em min, é obtido pela duração da chuva efetiva ( $t_r$ ), ou passo de tempo computacional, em min, e  $t_p$ , em min (Equação 6).

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p \quad (6)$$

O pico de vazão ( $Q_p$ ), em  $m^3/s$ , é determinado a partir do produto entre o PRF e a área da bacia ( $A$ ), em  $km^2$ , distribuído ao longo do  $T_p$ , em min (Equação 7).

$$Q_p = \frac{PRF \times A}{T_p} \quad (7)$$

#### 4.4.3. Baseflow: Constant Monthly

Para representar o fluxo de base no modelo HEC-HMS, foi utilizado o método *Constant Monthly*, que permite especificar valores de vazão de base variáveis ao longo do ano, adaptando-se às condições sazonais da bacia hidrográfica. Os valores de fluxo de base foram calculados a partir de dados históricos de uma estação fluviométrica localizada no exutório da bacia em estudo. Esses dados permitiram determinar a vazão específica mensal, expressa em  $(\text{m}^3/\text{s})/\text{km}^2$ , através da Equação 8.

$$q_{b,m} = \frac{Q_{b,m}}{A} \quad (8)$$

Onde:

$q_{b,m}$  = vazão específica de base no mês  $m$   $((\text{m}^3/\text{s})/\text{km}^2)$

$Q_{b,m}$  = vazão média no mês  $m$ , observada na estação fluviométrica  $(\text{m}^3/\text{s})$

$A$  = área total da bacia hidrográfica  $(\text{km}^2)$

Com os valores de vazão específica para cada mês, foi possível calcular a vazão de base para cada sub-bacia do modelo, aplicando a Equação 9.

$$Q_{b,s,m} = q_{b,m} \times A_s \quad (9)$$

Onde:

$Q_{b,s,m}$  = vazão de base da sub-bacia  $s$  no mês  $m$   $(\text{m}^3/\text{s})$

$A_s$  = área da sub-bacia  $s$   $(\text{km}^2)$

Os valores resultantes foram inseridos no HEC-HMS como parâmetros mensais de fluxo de base para cada sub-bacia, assegurando que o modelo capturasse adequadamente as variações sazonais no comportamento da bacia hidrográfica.

#### 4.4.4. Routing: Muskingum

O método Muskingum foi utilizado no HEC-HMS para a propagação do escoamento nos trechos de rios da bacia hidrográfica, devido à sua capacidade de representar a atenuação e o deslocamento do fluxo ao longo da rede de drenagem. Os parâmetros necessários para a aplicação do método incluem o tempo de deslocamento (K), o coeficiente de peso (X) e o

número de sub-trechos. O parâmetro K, em h, que representa o tempo necessário para que o fluxo percorra o trecho de rio, foi calculado a partir da relação entre o comprimento do trecho (L), em km, e a raiz quadrada da declividade média do rio (D), em m/km (Equação 10).

$$K = \frac{L}{\sqrt{D}} \quad (10)$$

O parâmetro X, adimensional, que varia entre 0 e 0,5, foi inicialmente estimado como 0,25. Esse valor médio foi escolhido como estimativa inicial, representando um equilíbrio entre os efeitos de armazenamento e de transporte no trecho. Posteriormente, ajustes foram realizados com base nos resultados das simulações para calibrar o modelo.

O número de sub-trechos foi determinado através da Equação 11, dividindo-se K pelo intervalo de tempo utilizado na simulação ( $\Delta t$ ), em h.

$$\text{Número de sub-trechos} = \frac{K}{\Delta t} \quad (11)$$

Após a definição desses parâmetros, o método Muskingum foi configurado para cada trecho de rio no HEC-HMS, objetivando simular a propagação do escoamento. Por fim, a equação do método Muskingum (Equação 12) baseia-se na relação entre a variação do volume armazenado em um trecho de rio e as vazões de entrada e saída.

$$M = K[XV_e + (1 - X)V_s] \quad (12)$$

Onde:

M = armazenamento no trecho ( $m^3$ )

$V_e$  = vazão de entrada ( $m^3/s$ )

$V_s$  = vazão de saída ( $m^3/s$ )

K = tempo de deslocamento (h)

X = coeficiente de peso (adimensional)

#### 4.5. Dados Pluviométricos

Os dados pluviométricos utilizados neste estudo foram extraídos do banco de dados utilizado por Xavier *et al.* (2022), que coletou dados da ANA e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) por meio de suas APIs (Interface de Programação de Aplicação, do

inglês *Application Programming Interface*). O banco de dados inclui informações de um total de 1.252 estações meteorológicas, sendo 642 estações manuais e 610 estações automáticas. Os dados de precipitação são diários e oriundos de 11.473 pluviômetros.

Para a seleção das estações de interesse, foi estabelecido um *buffer* de 25 km ao redor do limite da área de estudo. Todas as estações pluviométricas situadas dentro desse limite foram consideradas, assegurando uma representação espacial adequada da variabilidade das chuvas. A estimativa da precipitação em cada sub-bacia foi realizada por meio do método Inverse Distance Weighting (IDW). O IDW atribui maior peso às estações pluviométricas mais próximas do ponto de interesse, reduzindo a influência de estações mais distantes. Dessa forma, o cálculo foi feito considerando as distâncias entre as estações pluviométricas e os centróides de cada sub-bacia, garantindo maior precisão na estimativa da precipitação.

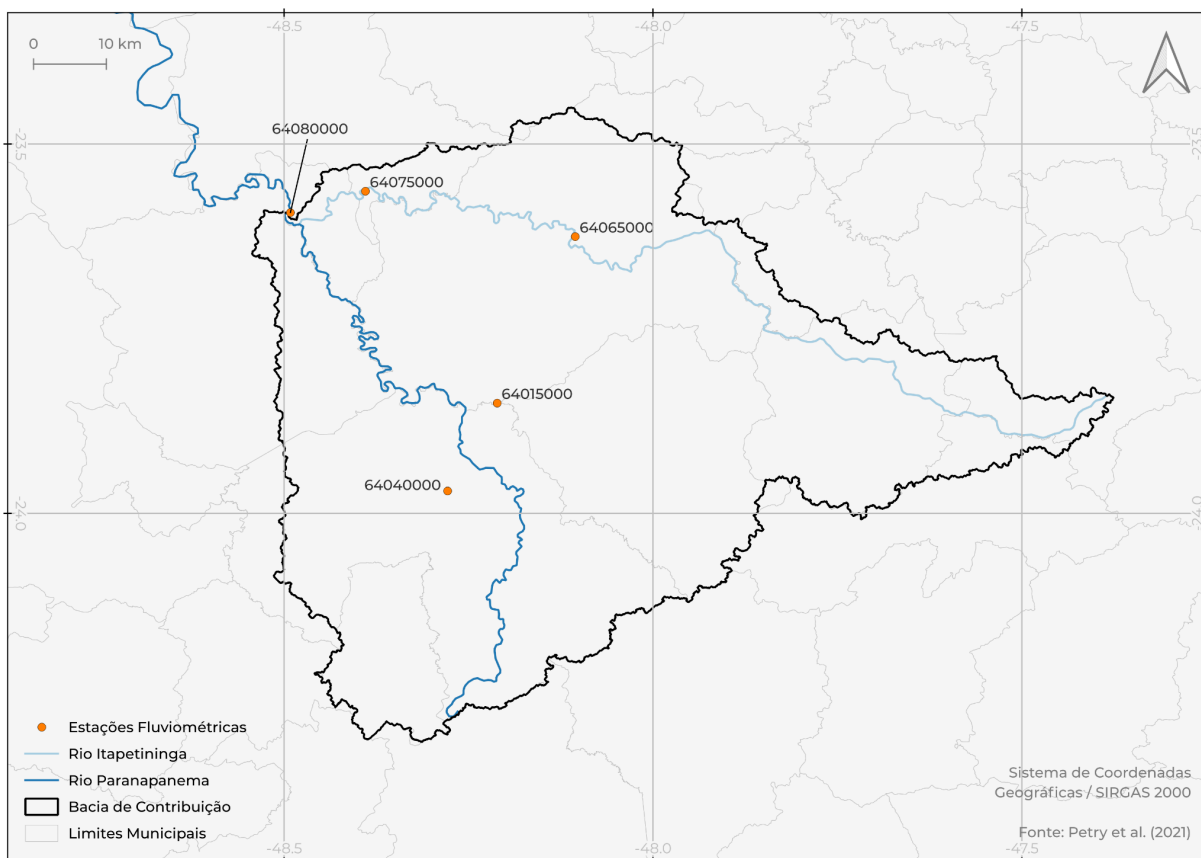
#### *4.6. Dados Fluviométricos*

Os dados fluviométricos utilizados neste estudo foram obtidos a partir de diversas fontes. Uma delas foi a ferramenta ANA Data Acquisition, desenvolvida pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Essa ferramenta, integrada ao QGIS, permitiu o acesso às séries históricas de vazões diárias fornecidas pela ANA. Além de otimizar o processo de coleta, a ferramenta assegura a compatibilidade dos dados com os sistemas de geoprocessamento empregados na análise.

Além disso, foram utilizados dados horários fornecidos pela CTG Brasil, concessionária responsável pela operação de hidrelétricas na região de estudo. A inclusão dessas informações complementares foi essencial para melhorar a abrangência temporal e espacial dos dados observados, mais precisamente no exutório da bacia de estudo. Os dados coletados foram organizados e analisados para assegurar sua consistência.

Os dados fluviométricos desempenham um papel crucial na calibração do modelo hidrológico, pois fornecem os hidrogramas observados, que servem como referência para ajustar os parâmetros do modelo e garantir a representatividade dos resultados simulados. Observa-se a localização das estações fluviométricas utilizadas na Figura 5.

**Figura 5: Localização das Estações Fluviométricas**



Fonte: Autoria própria (2025)

#### *4.7. Simulação, Calibração e Validação do Modelo Hidrológico*

A simulação no HEC-HMS foi estruturada com base em anos selecionados para análise comparativa de eventos extremos e condições hidrológicas variáveis. Os anos de 2004, 2005, 2011, 2016 e 2017 foram escolhidos por representarem cenários distintos de resposta da bacia hidrográfica. Destes, 2004 e 2016 tiveram registros de inundações, enquanto 2005, 2011 e 2017 foram caracterizados por vazões elevadas, porém sem relatos de transbordamentos. Essa seleção partiu de uma análise da série histórica da estação fluviométrica localizada no exutório da bacia, priorizando períodos que apresentaram picos de vazão. Isso permitiu comparar, ao longo do trabalho, situações com e sem ocorrência de inundações.

É importante ressaltar que as simulações utilizaram uma discretização temporal de 15 minutos para os resultados. Além disso, neste trabalho, o termo "evento" refere-se a cada evento de precipitação simulado no HEC-HMS, independentemente de corresponder a ocorrência de inundação. Ou seja, nem todo "evento" corresponde a uma inundação, a expressão é utilizada aqui apenas como convenção para designar os intervalos simulados.

O modelo foi desenvolvido seguindo uma sequência de etapas. Inicialmente, realizou-se a simulação do evento de 2004, escolhido como referência para análise devido à sua relevância histórica e disponibilidade de dados. Em seguida, procedeu-se à calibração do modelo utilizando o mesmo evento, ajustando parâmetros para que as saídas simuladas se aproximassem dos dados observados. Uma vez calibrado, o modelo foi testado para outros eventos: os parâmetros calibrados foram aplicados não apenas ao evento de 2004, mas também aos de 2005, 2011, 2016 e 2017, compondo a validação do modelo hidrológico.

Referente à calibração do modelo, ela foi realizada manualmente, ajustando parâmetros essenciais para melhorar a aderência entre os resultados simulados e os dados observados. Este processo foi conduzido iterativamente, buscando reduzir discrepâncias e representar com maior precisão os processos hidrológicos da bacia em estudo. Como citado, o modelo foi inicialmente rodado com os parâmetros iniciais para o evento de 2004, utilizando valores definidos com base nos dados teóricos calculados. A partir disso, a calibração foi realizada ajustando os valores de CN,  $I_a$  e os parâmetros do método de Muskingum (K, X e número de sub-trechos), de modo a considerar as especificidades dos trechos da bacia.

Para melhorar a representação do extravasamento do escoamento superficial em áreas propensas a inundação, foram inseridos *Diversions* (divisores de fluxo) em sub-bacias específicas do modelo, identificadas previamente por meio de análise de imagens de satélite. A seleção dessas áreas baseou-se na observação de eventos reais de inundação, nas quais foram mapeadas as sub-bacias com planícies de inundação. Esses divisores atuaram removendo permanentemente uma parcela do volume de água do canal, simulando o extravasamento e o armazenamento nas áreas adjacentes. A definição da porcentagem de água desviada foi ajustada empiricamente, com base na comparação entre os dados simulados e observados. O rio Itapetininga concentrou a maior quantidade de divisores, refletindo sua vulnerabilidade a extravasamentos em diversos trechos. Essa configuração foi essencial para melhorar a representação dos processos associados às planícies de inundação.

O rio Itapetininga também apresentou o maior número de ajustes durante a calibração, devido à discrepância inicial entre os hidrogramas simulados e os observados. O resultado da modelagem hidrológica do rio indicava uma resposta inadequada às condições de escoamento observadas nas estações fluviométricas. Para corrigir essas inconsistências, além dos divisores, foram feitos ajustes mais detalhados nos parâmetros de CN e  $I_a$  das sub-bacias contribuintes, além de refinamentos nos valores de K, X e número de sub-trechos do método de Muskingum. Esses ajustes foram essenciais para melhorar a representatividade do modelo e garantir que ele capturasse com maior precisão os fenômenos hidrológicos locais.

Após a calibração para o evento de 2004, o modelo foi rodado com os parâmetros calibrados para os eventos de 2005, 2011, 2016 e 2017. Para esses eventos, não foram realizados novos ajustes nos parâmetros, permitindo avaliar a capacidade do modelo de reproduzir os fenômenos hidrológicos em diferentes condições de chuva e escoamento.

A validação do modelo foi realizada utilizando o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que foram disponibilizados pelo HEC-HMS para cada evento e ponto de controle simulado. O NSE mede a capacidade do modelo de prever os valores observados em comparação com a média dos dados observados, sendo definido pela Equação 13.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{obs})^2} \quad (13)$$

Onde:

$Q_{obs,i}$  = valores observados

$Q_{sim,i}$  = valores simulados

$Q_{obs}$  = média dos valores observados

$n$  = número total de observações

Por sua vez,  $R^2$  quantifica a proporção da variabilidade dos dados observados que é explicada pelo modelo. Ele é calculado pela Equação 14.

$$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{obs})(Q_{sim,i} - Q_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{sim})^2}} \right)^2 \quad (14)$$

Onde:

$Q_{obs,i}$  = valores observados

$Q_{sim,i}$  = valores simulados

$Q_{obs}$  = média dos valores observados

$Q_{sim}$  = média dos valores simulados

$n$  = número total de observações

Valores de NSE próximos de 1 indicam uma boa aderência do modelo aos dados observados, enquanto valores negativos sugerem desempenho inferior ao uso da simples média dos dados. De forma similar, o  $R^2$  próximo de 1 reflete uma forte correlação entre os dados simulados e os observados. Esses índices forneceram uma avaliação quantitativa da qualidade do modelo, permitindo verificar sua capacidade de reproduzir com precisão os dados observados para os diferentes eventos e cenários.

## **5. Resultados e Discussão**

### *5.1. Características Fisiográficas da Bacia Hidrográfica*

A análise das sub-bacias hidrográficas é um passo essencial para compreender os processos hidrológicos que influenciam o comportamento de uma bacia como um todo. A delimitação resultou na identificação de 35 sub-bacias que compõem a área de estudo, cada uma com características específicas que influenciam diretamente sua resposta hidrológica.

As principais características fisiográficas analisadas incluíram a área de drenagem, o comprimento dos canais principais, a declividade média e outros parâmetros topográficos relevantes. Esses parâmetros foram extraídos diretamente do HEC-HMS após o processamento do ANADEM, garantindo precisão e consistência nos dados utilizados. A Tabela 4 apresenta um resumo dos parâmetros fisiográficos calculados para cada sub-bacia, enquanto a Figura 6 ilustra a divisão das sub-bacias na área de estudo.

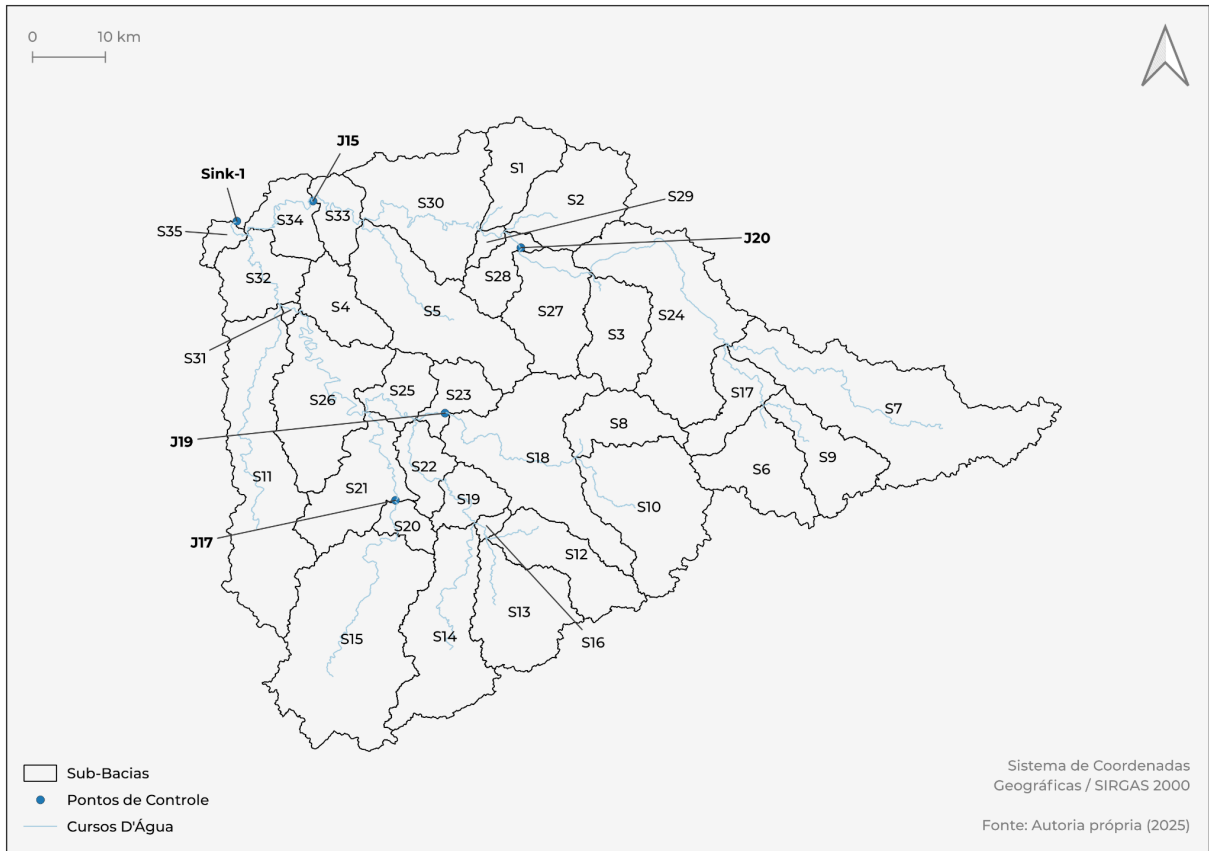
A área das sub-bacias variou entre 6,44 e 488,93 km<sup>2</sup>, refletindo a heterogeneidade da bacia hidrográfica. Sub-bacias menores apresentaram maior concentração de escoamento em resposta a eventos de precipitação, enquanto sub-bacias maiores mostraram uma resposta hidrológica mais atenuada. A declividade média dos canais principais oscilou entre 0,00261 e 0,01850 m/m, sendo um fator determinante para a velocidade do escoamento superficial. Esses dados foram essenciais para configurar os parâmetros iniciais no HEC-HMS e garantir que o modelo capturasse com fidelidade a dinâmica hidrológica da área de estudo.

**Tabela 4: Parâmetros Fisiográficos das Sub-Bacias da Área de Estudo**

<b>Rio</b>	<b>Sub-Bacia</b>	<b>Área de drenagem (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Comprimento do canal principal (km)</b>	<b>Declividade média do canal principal (m/m)</b>	
Itapetininga	S6	164,52	31,12	0,01238	
	S9	135,54	35,61	0,01064	
	S7	467,34	76,90	0,00593	
	S17	95,19	31,09	0,00475	
	S24	354,39	53,86	0,00277	
	S3	133,46	27,61	0,00695	
	S27	173,01	29,16	0,00493	
	S2	178,18	33,26	0,00443	
	S28	68,88	17,18	0,00870	
	S1	115,27	24,59	0,00624	
	S29	17,36	7,87	0,01205	
	S5	288,12	45,90	0,00384	
	S30	261,43	48,81	0,00352	
	S33	73,14	22,51	0,00627	
	S34	86,24	29,69	0,00467	
	Paranapanema	S10	277,49	38,45	0,00627
		S8	107,42	25,53	0,00657
S18		330,26	53,55	0,00453	
S13		197,08	33,12	0,01116	
S12		150,97	38,45	0,00650	
S14		255,55	55,74	0,00471	
S16		12,86	7,84	0,01850	
S19		67,84	19,36	0,00583	
S23		73,07	18,48	0,00684	
S22		72,38	21,53	0,00597	
S15		488,93	56,48	0,00542	
S20		41,62	13,81	0,00896	
S21		172,93	33,73	0,00502	
S25		78,37	20,92	0,00758	
S26		254,32	62,20	0,00261	
S4		102,80	18,28	0,00810	
S11		388,45	72,89	0,00467	
S31		6,44	5,18	0,01322	
S32	116,53	26,89	0,00424		
S35	25,19	10,16	0,01259		

Fonte: Autoria própria (2025)

**Figura 6: Divisão das Sub-Bacias e Localização dos Pontos de Controle**



Fonte: Autoria própria (2025)

### 5.2. Loss: SCS Curve Number

Com base nos valores de CN encontrados para a área de estudo, foi possível calcular  $S$  e, conseqüentemente,  $I_a$ . A Tabela 5 apresenta os valores de CN e  $I_a$  calculados para cada sub-bacia, enquanto a Figura 7 ilustra a distribuição espacial dos valores de CN.

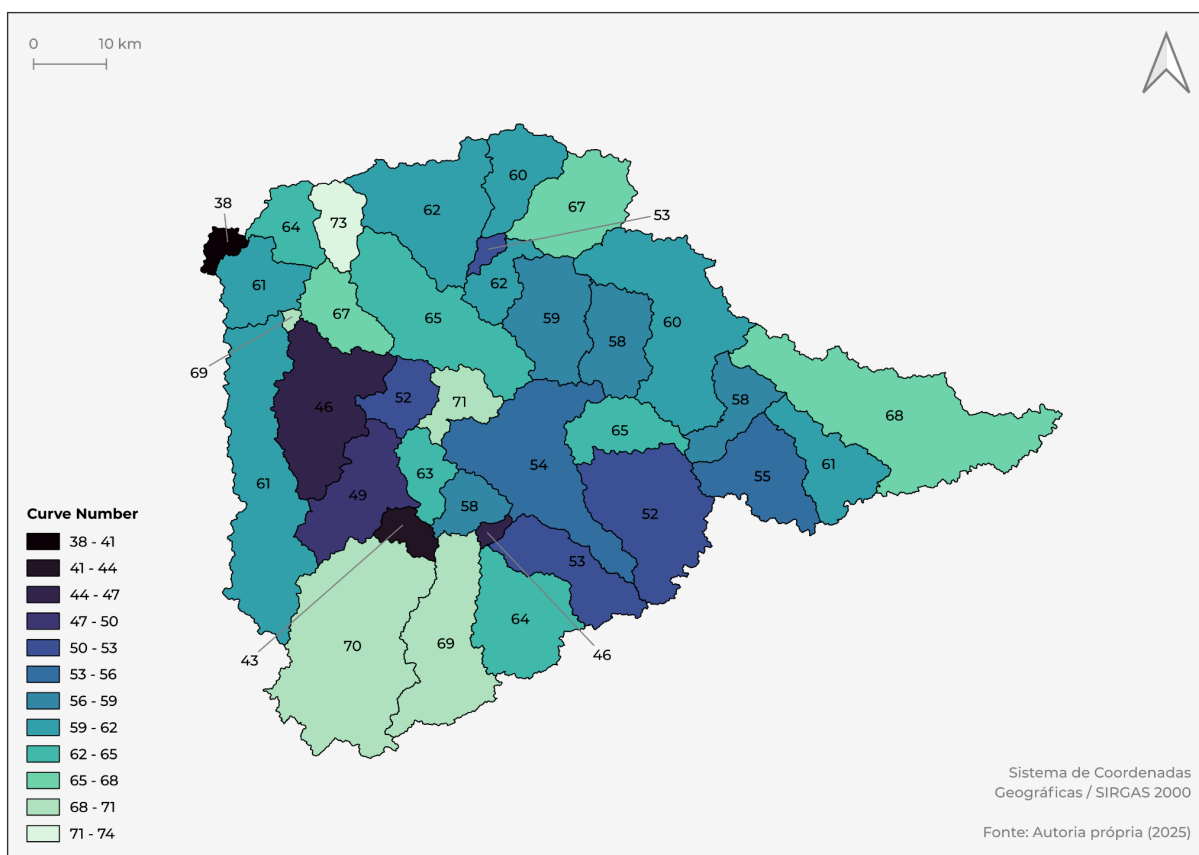
Os resultados indicaram variações significativas nos valores de CN entre as sub-bacias, refletindo as diferenças nas condições de uso do solo e cobertura vegetal. Essas variações impactaram diretamente os cálculos de  $I_a$ , com sub-bacias de CN mais elevados apresentando menores capacidades de retenção inicial, o que pode aumentar a propensão ao escoamento superficial em eventos de precipitação intensa.

**Tabela 5: Valores de CN e I<sub>a</sub> das Sub-Bacias**

<b>Rio</b>	<b>Sub-Bacia</b>	<b>CN</b>	<b>I<sub>a</sub> (mm)</b>
Itapetininga	S6	55	41,56
	S9	61	32,48
	S7	68	23,91
	S17	58	36,79
	S24	60	33,87
	S3	58	36,79
	S27	59	35,30
	S2	67	25,02
	S28	62	31,14
	S1	60	33,87
	S29	53	45,05
	S5	65	27,35
	S30	62	31,14
	S33	73	18,79
	S34	64	28,58
Paranapanema	S10	52	46,89
	S8	65	27,35
	S18	54	43,27
	S13	64	28,58
	S12	53	45,05
	S14	69	22,82
	S16	46	59,63
	S19	58	36,79
	S23	71	20,75
	S22	63	29,83
	S15	70	21,77
	S20	43	67,34
	S21	49	52,87
	S25	52	46,89
	S26	46	59,63
	S4	67	25,02
	S11	61	32,48
S31	69	22,82	
S32	61	32,48	
S35	38	82,88	

Fonte: Autoria própria (2025)

**Figura 7: Distribuição Espacial dos Valores de CN na Área de Estudo**



Fonte: Aatoria própria (2025)

### 5.3. Transform: SCS Unit Hydrograph

Os valores de  $t_c$  e  $t_p$  calculados para as sub-bacias estão apresentados na Tabela 6. Os resultados mostraram que sub-bacias com maior comprimento de curso d'água principal e menor declividade apresentaram tempos de concentração mais elevados, enquanto sub-bacias menores ou com declividades acentuadas tiveram valores mais baixos. Essas variações refletem as diferenças nas respostas hidrológicas das sub-bacias a eventos de precipitação, influenciando diretamente os tempos de pico e as vazões simuladas.

**Tabela 6: Valores de  $t_c$  e  $t_p$  das Sub-Bacias**

<b>Rio</b>	<b>Sub-Bacia</b>	<b><math>t_c</math> (min)</b>	<b><math>t_p</math> (min)</b>
Itapetininga	S6	658,05	394,83
	S9	777,14	466,29
	S7	1798,41	1079,04
	S17	959,93	575,96
	S24	1833,40	1100,04
	S3	751,90	451,14
	S27	899,22	539,53
	S2	1040,84	624,50
	S28	472,99	283,80
	S1	716,17	429,70
	S29	224,47	134,68
	S5	1420,31	852,19
	S30	1543,11	925,87
	S33	666,59	399,95
	S34	931,90	559,14
Paranapanema	S10	1017,53	610,52
	S8	722,69	433,61
	S18	1502,93	901,76
	S13	720,11	432,07
	S12	1003,13	601,88
	S14	1527,46	916,48
	S16	188,92	113,35
	S19	608,83	365,30
	S23	550,97	330,58
	S22	656,08	393,65
	S15	1460,35	876,21
	S20	393,59	236,16
	S21	1001,75	601,05
	S25	583,66	350,19
	S26	2103,30	1261,98
S4	510,96	306,58	
S11	1894,41	1136,64	
S31	155,46	93,28	
S32	895,18	537,11	
S35	269,95	161,97	

Fonte: Autoria própria (2025)

#### 5.4. Baseflow: Constant Monthly

A fim de representar o fluxo de base da bacia de estudo pelo método *Constant Monthly*, as vazões médias e as vazões específicas mensais foram calculadas (Tabela 7).

**Tabela 7: Vazões Médias Mensais e Vazões Específicas Mensais da Bacia de Estudo**

Mês	Vazão Média (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Específica (m <sup>3</sup> /s)/km <sup>2</sup>
Janeiro	131,13	0,02248
Fevereiro	139,87	0,02398
Março	100,50	0,01723
Abril	77,42	0,01327
Mai	62,83	0,01077
Junho	65,28	0,01119
Julho	57,17	0,00980
Agosto	45,84	0,00786
Setembro	51,31	0,00880
Outubro	59,60	0,01022
Novembro	66,92	0,01147
Dezembro	85,94	0,01474

Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se que as vazões médias mensais variam significativamente ao longo do ano, refletindo as variações sazonais características da região. A maior vazão média ocorreu em fevereiro, com 139,87 m<sup>3</sup>/s, enquanto a menor foi registrada em agosto, com 45,84 m<sup>3</sup>/s. Essa variação pode ser atribuída à distribuição anual das chuvas na BH-ALPA, onde o período mais chuvoso vai de setembro a março, sendo janeiro o mês de maior pluviosidade, seguido por fevereiro e março, e agosto se apresentando como o mês mais seco (Cury, 2005). As vazões específicas, por se tratarem da relação entre a vazão média e a área da bacia, seguiram o mesmo padrão. O valor mais alto, 0,02398 (m<sup>3</sup>/s)/km<sup>2</sup>, também foi observado em fevereiro, enquanto o menor, 0,00785 (m<sup>3</sup>/s)/km<sup>2</sup>, seguiu ocorrendo no mês de agosto.

#### 5.5. Routing: Muskingum

O método de Muskingum foi aplicado para realizar a propagação do escoamento nos canais de drenagem da área de estudo. Este método é reconhecido pela simplicidade e pela capacidade de representar a relação entre entrada e saída de vazão em cursos d'água. Para este estudo, o valor inicial adotado para X foi de 0,25, refletindo um equilíbrio entre

armazenamento e transporte de escoamento. Já os valores de K e o número de sub-trechos foram calculados a partir dos dados teóricos. A Tabela 8 apresenta os valores iniciais de X, K e número de sub-trechos para os trechos analisados. Esses valores foram utilizados para configurar o modelo hidrológico e realizar as primeiras simulações.

**Tabela 8: Valores Iniciais de X, K e Sub-Trechos para os Trechos**

<b>Rio</b>	<b>Trecho</b>	<b>X</b>	<b>K (h)</b>	<b>Número de Sub-Trechos</b>
Itapetininga	R9	0,25	18,82	1
	R8	0,25	49,42	2
	R19	0,25	37,71	2
	R20	0,25	3,90	1
	R5	0,25	14,68	1
	R4	0,25	60,01	3
	R11	0,25	22,50	1
	R12	0,25	38,69	2
	R13	0,25	36,30	2
	R18	0,25	7,39	1
	R10	0,25	2,93	1
	R14	0,25	23,40	1
Paranapanema	R17	0,25	23,39	1
	R7	0,25	37,32	2
	R15	0,25	7,02	1
	R16	0,25	26,27	1
	R6	0,25	98,16	4
	R3	0,25	10,66	1
	R2	0,25	40,43	2
	R1	0,25	15,89	1

Fonte: Autoria própria (2025)

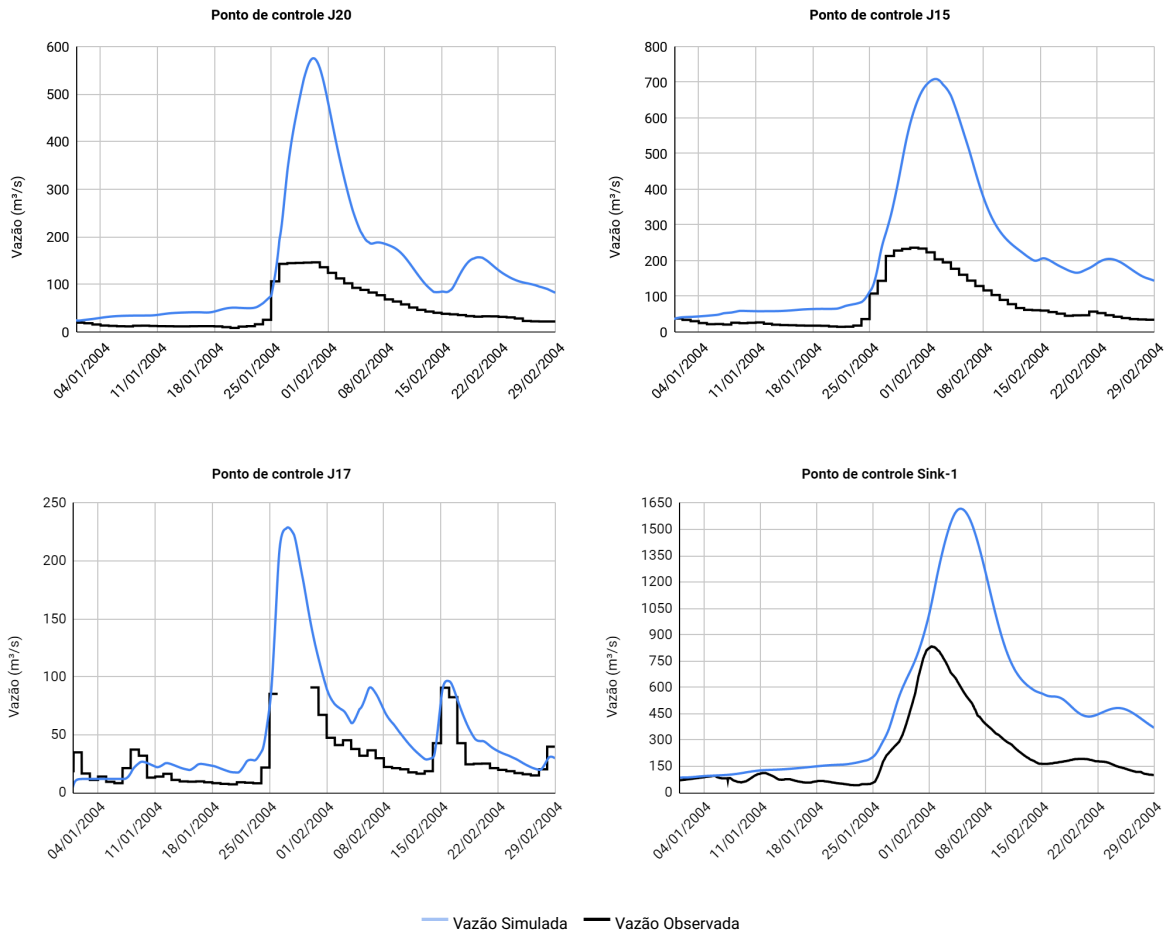
### *5.6. Resultados, Calibração e Validação do Modelo*

Os resultados obtidos durante a execução, calibração e validação do modelo hidrológico evidenciam a complexidade de representar as respostas hidrológicas dos rios Itapetininga e Paranapanema, especialmente em eventos extremos, como os registrados em 2004 e 2016. A calibração utilizou os dados do ano de 2004, e os parâmetros ajustados foram aplicados às simulações dos anos de 2005, 2011, 2016 e 2017, com o objetivo de validar o modelo. Vale salientar que 2005, 2011 e 2017 não apresentaram inundações, o que

possibilitou a análise comparativa entre períodos com e sem eventos extremos. O desempenho do modelo foi analisado através de pontos de controle: J17 e J19, localizados no rio Itapetininga; J15 e J20, no rio Paranapanema; e no exutório principal, identificado como Sink-1. A localização desses pontos pode ser visualizada na Figura 6.

Os hidrogramas da Figura 8 mostram diferenças entre as vazões simuladas e observadas para o evento de 2004, antes da calibração do modelo. Observa-se que o modelo reproduz a tendência geral de escoamento, mas registra desvios nos picos de vazão e nas taxas de recessão, o que justifica ajustes nos parâmetros hidrológicos visando adequar a representação dos processos da bacia aos dados observados.

**Figura 8: Hidrogramas Pré-Calibração do Evento de 2004**

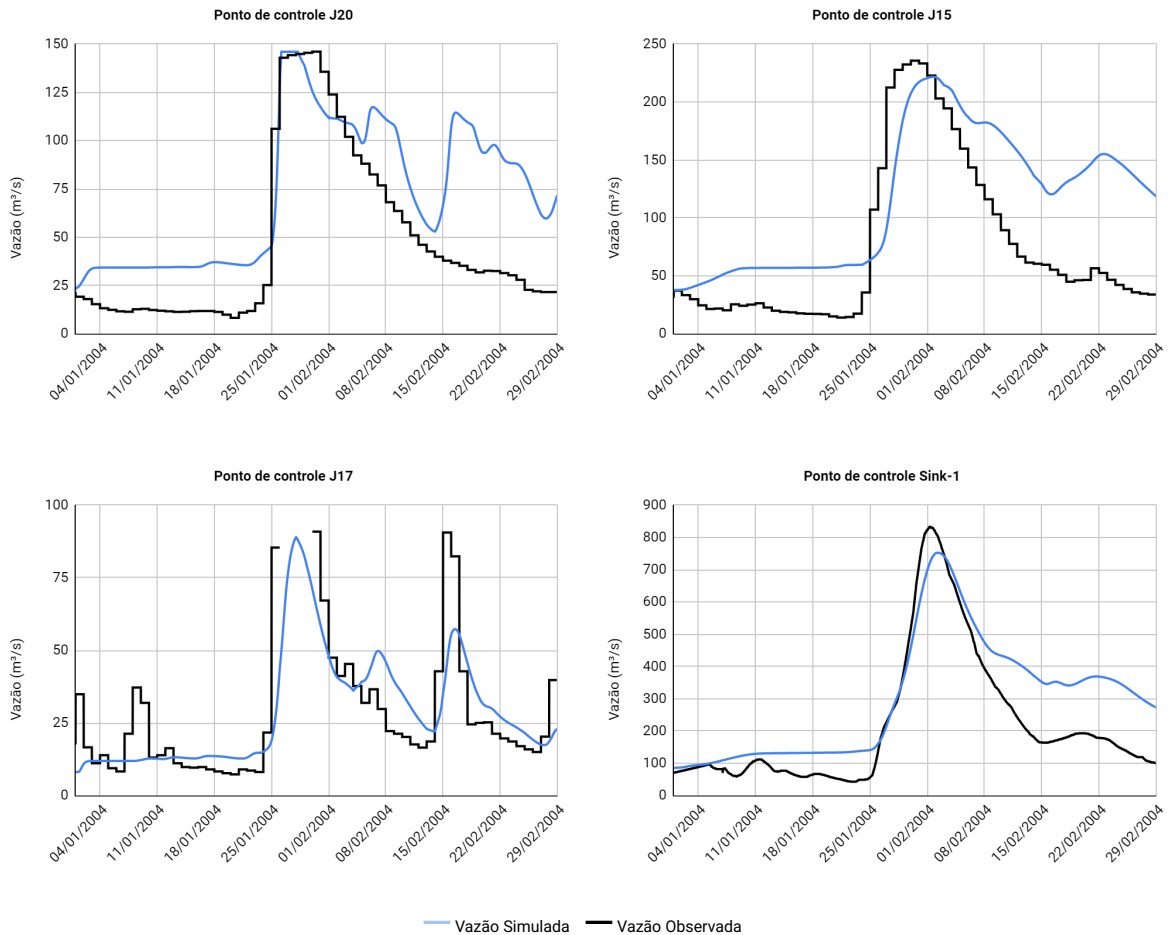


Fonte: Autoria própria (2025)

Após a calibração, conforme ilustrado na Figura 9, as vazões simuladas e observadas exibem maior correspondência. Os picos de vazão aproximaram-se dos observados, e a fase de recessão apresenta menor divergência. Esse resultado está associado às modificações nos

parâmetros, que ampliaram a capacidade do modelo de representar os processos hidrológicos envolvidos no evento.

**Figura 9: Hidrogramas Pós-Calibração do Evento de 2004**



Fonte: Autoria própria (2024)

A Tabela 9 exibe os índices de desempenho do modelo hidrológico para o evento de inundação de 2004, comparando resultados pré e pós-calibração. Na etapa sem calibração, os valores de NSE negativos em pontos de controle (como -9,149 no J20, -7,092 no J15 e -2,452 no exutório) indicam diferenças significativas entre as vazões simuladas e observadas. Esses resultados sugerem que, na condição inicial, o modelo não reproduzia os processos hidrológicos da bacia conforme os dados observados.

**Tabela 9: Valores de NSE e R<sup>2</sup> para o Evento de 2004**

2004	Itapetininga				Paranapanema		Exutório	
	J20		J15		J17		Sink-1	
	NSE	R <sup>2</sup>	NSE	R <sup>2</sup>	NSE	R <sup>2</sup>	NSE	R <sup>2</sup>
Sem calibração	-9,149	0,86	-7,092	0,85	-0,199	0,70	-2,452	0,76
Com calibração	0,342	0,69	0,237	0,59	0,515	0,52	0,700	0,84

Fonte: Autoria própria (2025)

Após a calibração, os índices de NSE apresentaram valores positivos em todos os pontos. No exutório, por exemplo, os valores foram NSE de 0,700 e R<sup>2</sup> de 0,84, indicando maior correspondência entre as vazões simuladas e observadas. Nos pontos intermediários, como J20 no Itapetininga, registrou-se NSE de 0,342 e R<sup>2</sup> de 0,69, enquanto J17 no Paranapanema obteve NSE de 0,515 e R<sup>2</sup> de 0,52. Esses resultados apontam para uma representação parcial das dinâmicas hidrológicas nesses trechos. A variação no desempenho pós-calibração pode estar associada à influência de planícies de inundação, diferenças no uso do solo e processos hidrológicos que não foram totalmente capturados pelos ajustes.

Inicialmente, testou-se a calibração automática do modelo, mas os parâmetros ajustados não reproduziram os padrões observados nas vazões da bacia. Diante disso, adotou-se a calibração manual, que permitiu ajustes mais detalhados dos parâmetros e a identificação de relações entre processos hidrológicos e resposta do modelo. Esse método possibilitou observar fatores como a influência de planícies de inundação e a variação espacial na resposta hidrológica dos trechos da bacia. Os ajustes realizados resultaram em aumento na proximidade entre vazões simuladas e observadas, conforme indicado pelo NSE e R<sup>2</sup>.

A Tabela 10 apresenta os parâmetros calibrados manualmente para as sub-bacias da área de estudo, incluindo CN, I<sub>a</sub> e t<sub>p</sub>. Esses valores foram ajustados mediante processo iterativo, visando representar o comportamento hidrológico observado durante o evento de 2004. Posteriormente, os mesmos parâmetros foram aplicados na simulação dos eventos de 2005, 2011, 2016 e 2017, com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo em diferentes cenários hidrológicos. A aplicação aos demais eventos permitiu identificar variações na resposta do modelo frente a mudanças nas condições hidrológicas, mesmo com os parâmetros calibrados especificamente para o evento de 2004.

**Tabela 10: Parâmetros Calibrados para as Sub-Bacias**

<b>Rio</b>	<b>Sub-Bacia</b>	<b>CN</b>	<b>I<sub>a</sub> (mm)</b>	<b>t<sub>p</sub> (min)</b>
Itapetininga	S6	30	74,80	394,83
	S9	34	58,50	466,29
	S7	31	43,00	1079,04
	S17	30	66,20	575,96
	S24	27	61,00	1100,04
	S3	33	66,20	451,14
	S27	31	63,50	539,53
	S2	37	45,00	624,5
	S28	31	56,00	283,8
	S1	32	61,00	429,7
	S29	19	81,10	134,68
	S5	34	49,20	852,19
	S30	29	56,00	925,87
	S33	29	33,80	399,95
	S34	30	51,40	559,14
Paranapanema	S10	33	84,40	610,52
	S8	27	49,20	433,61
	S18	32	77,90	901,76
	S13	27	51,40	432,07
	S12	35	81,10	601,88
	S14	23	41,10	916,48
	S16	29	107,30	113,35
	S19	36	66,20	365,3
	S23	32	37,30	330,58
	S22	35	53,70	393,65
	S15	22	39,20	876,21
	S20	25	121,20	236,16
	S21	26	95,20	601,05
	S25	23	84,40	350,19
	S26	34	107,30	1261,98
	S4	31	45,00	306,58
	S11	35	58,50	1136,64
S31	28	41,10	93,28	
S32	31	58,50	537,11	
S35	26	149,20	161,97	

Fonte: Autoria própria (2025)

Os parâmetros calibrados para os trechos fluviais, apresentados na Tabela 11, também foram definidos por meio do processo iterativo aplicado às sub-bacias. Os ajustes consideraram os valores de K, X e o número de sub-trechos, visando representar os processos de propagação das vazões ao longo dos rios. É importante observar que, apesar de o valor 0 para o parâmetro X do método de Muskingum não ser convencional, uma vez que este parâmetro pondera a influência entre as vazões de entrada e saída no armazenamento, ele foi adotado na calibração por proporcionar os melhores índices de desempenho do modelo. As simulações dos demais períodos seguiram com a aplicação desses parâmetros.

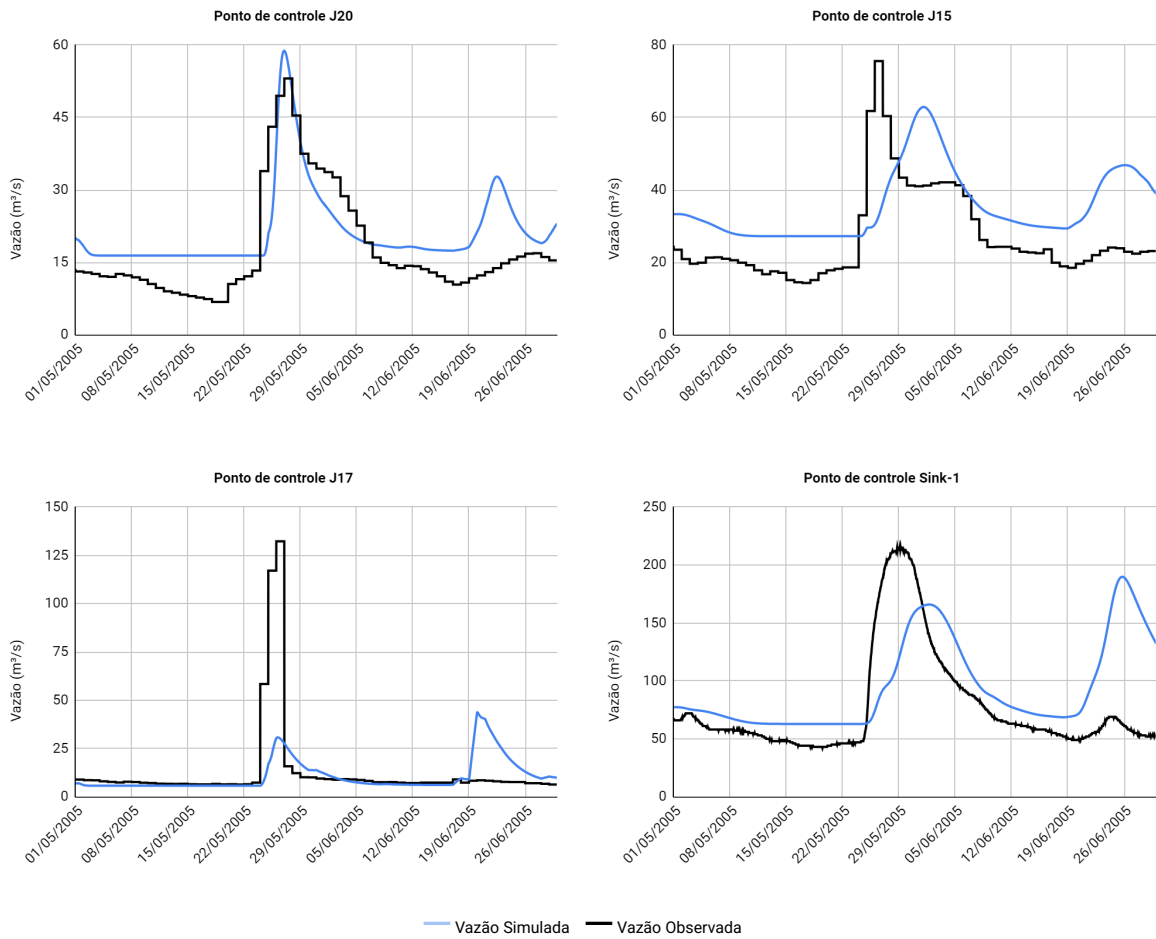
**Tabela 11: Parâmetros Calibrados para os Trechos**

<b>Rio</b>	<b>Trecho</b>	<b>X</b>	<b>K (h)</b>	<b>Número de Sub-Trechos</b>
Itapetininga	R9	0	2,05	5
	R8	0	16,38	5
	R19	0	16,37	5
	R20	0	42,55	5
	R5	0	7,95	5
	R4	0	5,18	5
	R11	0	66,01	5
	R12	0	24,75	5
Paranapanema	R13	0,2	26,12	5
	R18	0,2	4,91	5
	R10	0,2	18,39	5
	R14	0,2	68,71	5
	R17	0,2	7,46	5
	R7	0,2	28,30	5
	R15	0,2	20,70	5
	R16	0,2	54,36	5
	R6	0,2	41,49	5
	R3	0,2	4,30	5
	R2	0	16,15	5
R1	0	25,41	5	

Fonte: Autoria própria (2025)

Os hidrogramas das Figuras 10, 11, 12 e 13 exibem os resultados das simulações para os eventos de 2005, 2011, 2016 e 2017, respectivamente. A Figura 10 mostra os hidrogramas observados e simulados do evento de 2005, ano sem registros de inundação.

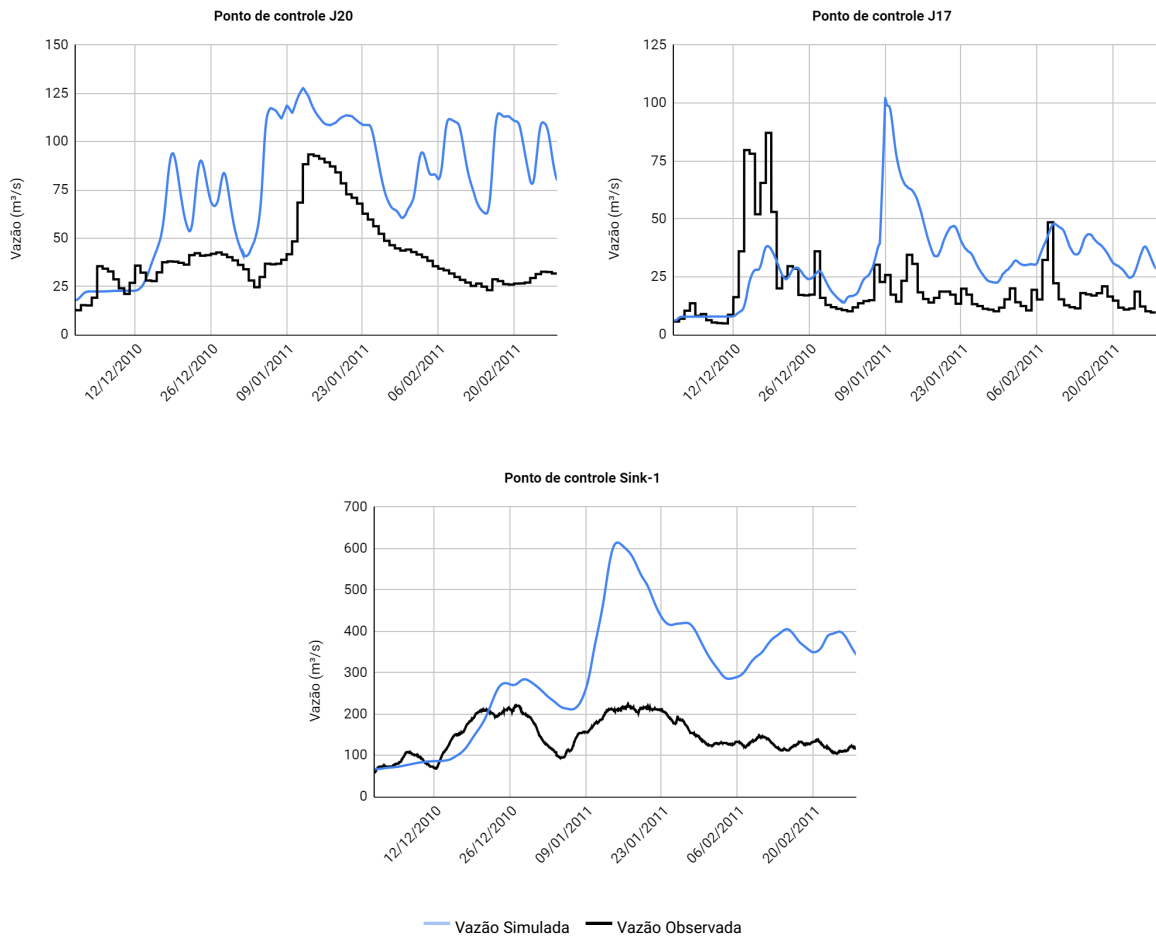
**Figura 10: Hidrogramas do Evento de 2005**



Fonte: Autoria própria (2025)

O evento de 2011, mostrado na Figura 11, evidenciou dificuldades do modelo em representar condições hidrológicas distintas, independentemente de registros de inundação. Os hidrogramas registraram divergências entre as vazões simuladas e observadas, especialmente nos trechos intermediários da bacia. Esses resultados podem estar associados a processos locais, como armazenamento em áreas úmidas ou alterações no regime de escoamento, que não foram totalmente incorporados pelos parâmetros ajustados.

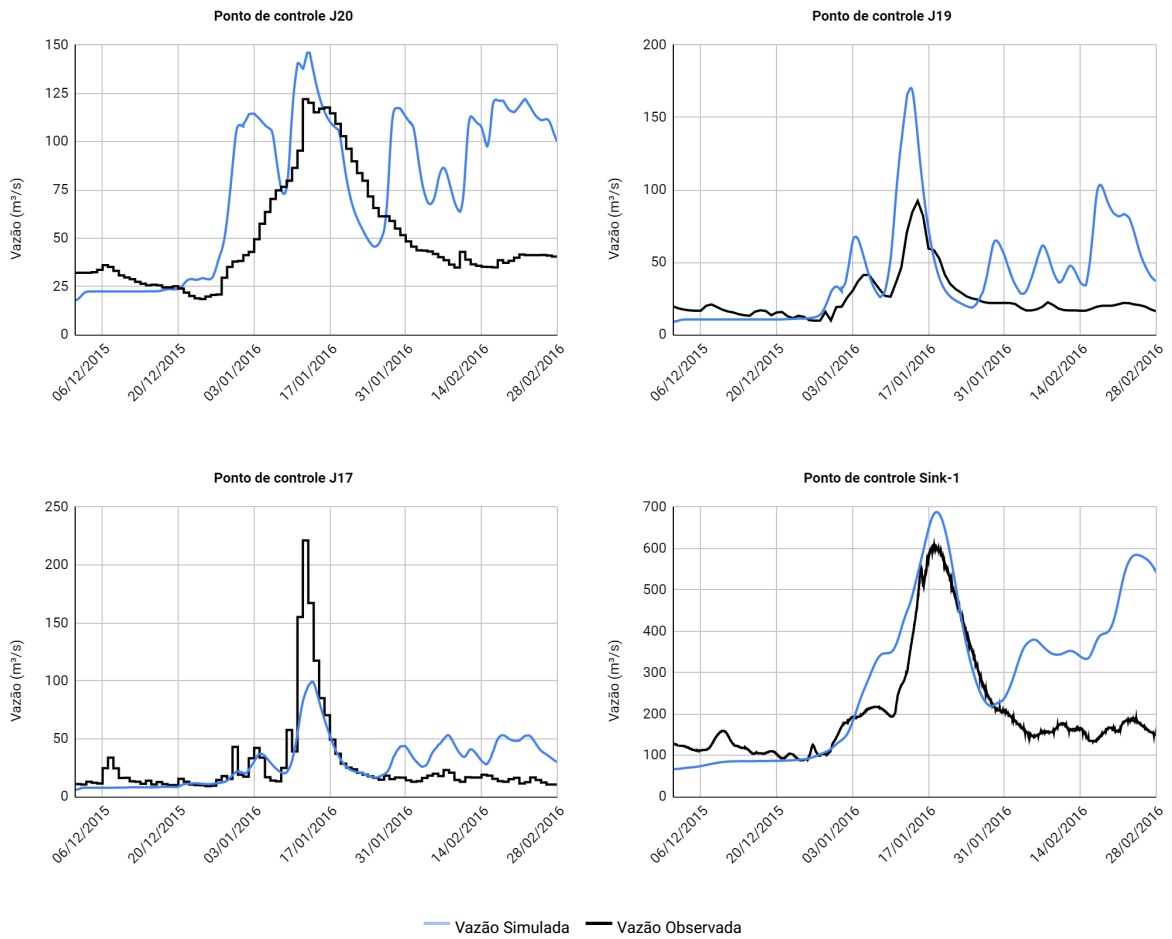
**Figura 11: Hidrogramas do Evento de 2011**



Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 12 apresenta os hidrogramas do evento de 2016, ano com registro de inundação. Embora o modelo tenha sido calibrado para o evento de 2004, também caracterizado por inundação, os resultados indicam divergências na resposta hidrológica. Os hidrogramas simulados reproduziram a tendência geral das vazões observadas, ao mesmo tempo que houve uma subestimação do pico no ponto de controle J17. Esse comportamento sugere que os parâmetros calibrados para um cenário específico não se aplicam integralmente a eventos com condições hidrológicas distintas.

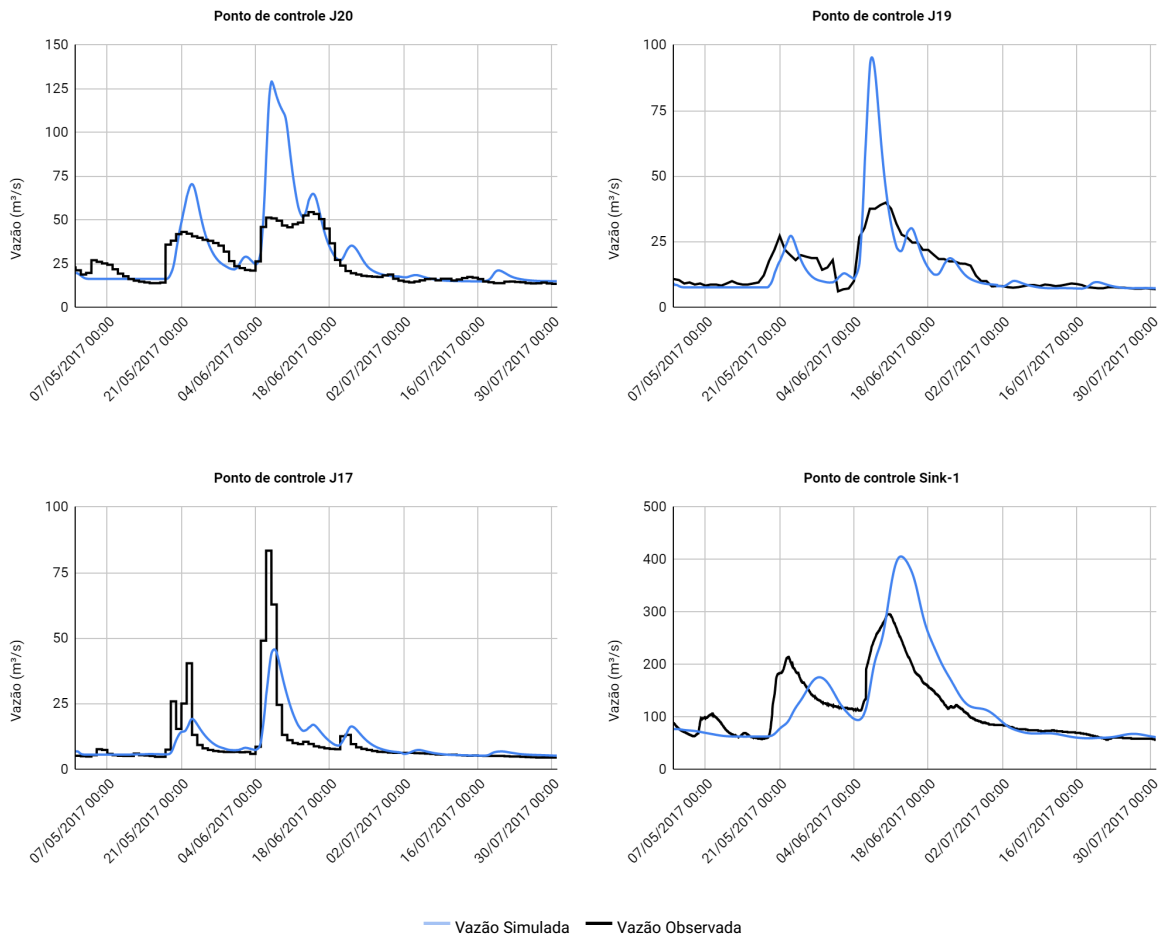
**Figura 12: Hidrogramas do Evento de 2016**



Fonte: Autoria própria (2025)

Por fim, a Figura 13 ilustra os resultados de 2017, ano sem registros de inundação. Nesse evento, o modelo registrou maior proximidade entre as vazões simuladas e observadas. Embora persistam divergências nos valores de pico, os resultados indicam menor divergência global em comparação a outros anos, como 2011 e 2016.

**Figura 13: Hidrogramas do Evento de 2017**



Fonte: Autoria própria (2025)

A Tabela 12 resume os índices de desempenho para os eventos de 2005, 2011, 2016 e 2017. Os resultados apresentaram variação entre os pontos de controle e os anos analisados. No evento de 2011, por exemplo, registrou-se valores de NSE negativos em todos os pontos, enquanto em 2005 e 2017 tiveram pontos com valores de NSE positivos. Essas diferenças estão associadas às características hidrológicas específicas de cada evento.

**Tabela 12: Valores de NSE e R<sup>2</sup> para os Eventos de 2005, 2011, 2016 e 2017**

Ano do evento	Itapetininga				Parapanema				Exutório	
	J20		J15		J19		J17		Sink-1	
	NSE	R <sup>2</sup>	NSE	R <sup>2</sup>	NSE	R <sup>2</sup>	NSE	R <sup>2</sup>	NSE	R <sup>2</sup>
2005	0,539	0,66	-0,276	0,27	-	-	0,124	0,13	-0,107	0,20
2011	-5,163	0,28	-	-	-	-	-1,350	0,04	-18,395	0,32
2016	-1,502	0,28	-	-	-2,969	0,47	0,441	0,46	-0,493	0,49
2017	-0,687	0,66	-	-	-0,186	0,66	0,540	0,55	0,214	0,66

Fonte: Autoria própria (2025)

Em 2005, os resultados variaram entre os pontos de controle. No rio Itapetininga, o ponto J20 registrou NSE de 0,539 e R<sup>2</sup> de 0,66, indicando representação das vazões observadas. Já o ponto J15 apresentou NSE de -0,276 e R<sup>2</sup> de 0,27, com valores de NSE e R<sup>2</sup> mais baixos, sugerindo dificuldades na calibração ou na representação de processos locais, como armazenamento ou contribuições de fluxo base. No rio Parapanema, o ponto J17 obteve NSE de 0,124 e R<sup>2</sup> de 0,13, nos quais o modelo não reproduziu a variabilidade das vazões observadas. No exutório, os valores foram NSE de -0,107 e R<sup>2</sup> de 0,20, refletindo os erros acumulados nos trechos a montante e apontando para a necessidade de ajustes.

Os resultados de 2011 apresentaram valores de NSE negativos em todos os pontos de controle analisados. No rio Itapetininga, o ponto J20 registrou NSE de -5,163 e R<sup>2</sup> de 0,28, indicando divergências entre as vazões simuladas e observadas. No rio Parapanema, o ponto J17 obteve NSE de -1,350 e R<sup>2</sup> de 0,04, sugerindo desafios na representação dos processos hidrológicos desse trecho. No exutório (Sink-1), os valores foram NSE de -18,395 e R<sup>2</sup> de 0,32. Esses resultados estão associados a características hidrológicas específicas do período que não foram totalmente incorporadas pelo modelo após a calibração.

Em 2016, os resultados do modelo variaram entre os pontos de controle analisados. No rio Itapetininga, o ponto J20 registrou NSE de -1,502 e R<sup>2</sup> de 0,28, indicando divergências entre as vazões simuladas e observadas. Para o ponto J15, a ausência de dados de vazão observada inviabilizou a avaliação. No rio Parapanema, o ponto J19 apresentou NSE de -2,969 e R<sup>2</sup> de 0,47, com valores de NSE negativos que sugerem incompatibilidade entre as simulações e os dados observados. No mesmo rio, o ponto J17 obteve NSE de 0,441 e R<sup>2</sup> de 0,46, enquanto no exutório os índices foram NSE de -0,493 e R<sup>2</sup> de 0,49. Esses resultados estão associados a discrepâncias acumuladas nos trechos a montante e à complexidade de processos hidrológicos não representados integralmente pelo modelo pós-calibração.

Os resultados de 2017 exibiram diferenças nos resultados em relação a 2011, com variação nos índices entre os pontos de controle. No rio Itapetininga, o ponto J20 registrou NSE de -0,687 e  $R^2$  de 0,66, indicando divergências entre as vazões simuladas e observadas, mas com reprodução parcial da variabilidade. No rio Paranapanema, os valores de NSE e  $R^2$  foram numericamente maiores: o ponto J19 apresentou NSE de -0,186 e  $R^2$  de 0,66, enquanto o ponto J17 obteve NSE de 0,540 e  $R^2$  de 0,55, os índices mais elevados do evento. No exutório (Sink-1), os índices foram NSE de 0,214 e  $R^2$  de 0,66, com as simulações reproduzindo parcialmente a variabilidade das vazões observadas nesse ponto.

O evento de inundação de 2004 registrou os maiores valores de NSE entre os analisados, o que já era esperado por se tratar do evento utilizado para calibração dos parâmetros do modelo. A aplicação dos mesmos parâmetros em outros eventos, caracterizados por condições hidrológicas distintas, resultou em variação no desempenho do modelo. Esses resultados destacam a influência de fatores climáticos e hidrológicos locais no modelo, cuja representação pode demandar ajustes específicos para diferentes cenários.

A comparação entre os pontos de controle dos rios Itapetininga e Paranapanema revelou diferenças nos valores de NSE e  $R^2$  entre os dois sistemas. No Paranapanema, os pontos J17 e J19 registraram, no geral, maiores valores de NSE e maior proximidade entre vazões simuladas e observadas, possivelmente associados a características como menor influência de planícies de inundação, homogeneidade nos parâmetros hidrológicos e padrões de escoamento mais simples. No Itapetininga, os pontos J15 e J20 apresentaram valores de NSE inferiores, coincidindo com áreas de maior complexidade hidrológica, como a presença de áreas alagáveis que influenciaram processos como infiltração, armazenamento e liberação de água, exigindo mais ajustes específicos nos parâmetros do modelo.

A análise dos resultados da calibração e validação evidencia tanto as potencialidades quanto as limitações do modelo aplicado. A variação no desempenho entre os pontos de controle ao longo dos rios Itapetininga e Paranapanema reflete a complexidade hidrológica da bacia estudada. Fatores como a influência de planícies de inundação, variações na homogeneidade dos parâmetros hidrológicos e a interação com eventos extremos contribuem para a variabilidade observada. A maior dificuldade do modelo em representar os processos hidrológicos no rio Itapetininga, aponta para a necessidade de ajustes mais robustos que incorporem as características das áreas alagáveis e processos de armazenamento e liberação de água. Essa limitação foi especialmente evidente nos anos de 2016 e 2011, quando os valores de NSE negativos reforçaram a incapacidade do modelo em prever vazões com precisão. Por outro lado, o rio Paranapanema apresentou maiores valores de NSE, sugerindo

que sistemas de escoamento em regiões com menor interferência de planícies de inundação são mais bem representados pelo modelo. Isso indica que características hidrológicas locais exercem influência no desempenho do modelo e reforçam a importância de calibrações que considerem as especificidades de cada trecho da bacia.

A aplicação de parâmetros calibrados para 2004 em anos subsequentes destacou outro desafio: a dificuldade de extrapolação para condições hidrológicas significativamente diferentes. Isso reforça a necessidade de calibrações capazes de capturar as variações interanuais em função de mudanças climáticas, alterações no uso do solo ou variações no regime hídrico. Além disso, a análise dos índices de desempenho no exutório (valores de NSE e  $R^2$ ) ressaltou um aspecto crucial: os erros propagados ao longo da bacia têm influência direta no desempenho acumulado no ponto de saída. Embora os trechos a montante apresentem menores valores de NSE e  $R^2$ , os ajustes aplicados ao modelo podem ser suficientes para captar os padrões gerais de escoamento no exutório, como observado a partir dos valores de NSE e  $R^2$  próximos a 1 no exutório do evento de 2004. Esses resultados indicam que, apesar das dificuldades em pontos específicos, o modelo apresenta potencial para representar a variabilidade das vazões em escala mais ampla, desde que seja aprimorado para lidar com as particularidades locais e condições extremas.

A representatividade dos eventos simulados pode ter sido influenciada pela distribuição espacial e disponibilidade dos dados pluviométricos. Como diferentes eventos foram registrados por distintos pluviômetros, há a possibilidade de que alguns deles não tenham captado adequadamente a variabilidade espacial da precipitação, o que não foi verificado neste trabalho. Além disso, a extrapolação dos parâmetros calibrados para anos distintos pressupõe que os processos hidrológicos permaneçam inalterados, o que pode não ser verdadeiro. Diferenças nas condições climáticas, no uso do solo e na dinâmica dos reservatórios naturais ao longo dos anos podem afetar a resposta hidrológica da bacia, impactando principalmente a comparação entre eventos que resultaram ou não em inundações. Isso reforça a necessidade de calibrações ajustadas para diferentes condições hidrológicas, considerando variações interanuais e processos específicos.

Portanto, os resultados reforçam a importância de um enfoque híbrido na modelagem hidrológica, que combine uma calibração inicial robusta com ajustes adaptados às mudanças nas condições hidrológicas ao longo do tempo. Além disso, é essencial aumentar o detalhamento dos dados de caracterização da área de estudo fornecidas ao modelo, considerando as particularidades locais, como a influência das áreas alagáveis, que afetam a retenção e liberação de água, e o papel do fluxo base na manutenção das vazões. Nesse

contexto, a realização de calibração com base em mais de um evento hidrológico, contemplando características distintas, como cenários com e sem inundação, possivelmente resultaria em melhores resultados, pois ampliaria a representatividade dos processos hidrológicos no modelo. A integração desses aspectos é crucial para aprimorar a precisão, reduzindo discrepâncias em eventos extremos e condições específicas. Essa abordagem melhora a representatividade dos processos hidrológicos e amplia a aplicabilidade do modelo em estudos futuros e em cenários de planejamento e gestão de recursos hídricos.

## **6. Considerações Finais**

O objetivo deste trabalho foi modelar a bacia de contribuição da confluência dos rios Itapetininga e Paranapanema utilizando o modelo hidrológico HEC-HMS, com foco em explorar tanto as potencialidades quanto os desafios dessa abordagem em sistemas hidrológicos complexos. Os resultados evidenciaram limitações no modelo, especialmente na representação de processos específicos, e a necessidade de avanços para uma melhor compreensão das dinâmicas hidrológicas locais, a fim de aprimorar a correspondência entre dados simulados e observados. No evento de 2004, no exutório, a calibração resultou em NSE de 0,700 e  $R^2$  de 0,84, reproduzindo os padrões gerais de escoamento. No entanto, em 2005, 2011, 2016 e 2017, neste mesmo ponto de controle, o modelo apresentou valores de NSE negativos ou próximos de 0 e valores de  $R^2$ , em sua maioria, mais próximos de 0. Esses resultados sugerem que áreas alagáveis e processos de armazenamento e liberação de água não foram integralmente incorporados pelos parâmetros ajustados, impactando negativamente a precisão das simulações em cenários hidrológicos distintos.

A modelagem revelou a complexidade intrínseca das bacias hidrográficas, que apresentam características heterogêneas e interações marcantes entre os sistemas fluviais e áreas adjacentes. Embora os resultados não tenham sido consistentes ou amplamente expressivos, o estudo trouxe reflexões importantes sobre os desafios associados à modelagem hidrológica, reafirmando a natureza exigente desse tipo de pesquisa. A relevância de iniciativas como esta reside em sua contribuição para a gestão integrada de recursos hídricos, auxiliando na mitigação e adaptação aos riscos em regiões suscetíveis a eventos extremos, como inundações. A modelagem hidrológica desempenha um papel crucial na previsão de cenários, no planejamento de medidas preventivas e no apoio ao desenvolvimento de políticas públicas voltadas para a segurança hídrica e o uso sustentável dos recursos naturais.

Para estudos futuros, sugere-se a verificação da distribuição dos pluviômetros na bacia, a calibração do modelo para eventos sem inundação e a aplicação para eventos com

inundação, bem como a validação dos dados pluviométricos e fluviométricos utilizados. Também recomenda-se a exploração de alternativas que aprimorem a representatividade dos modelos em bacias complexas. Isso pode incluir o uso de parâmetros que capturem melhor as dinâmicas de áreas alagáveis, infiltração e armazenamento, além de métodos de calibração e validação mais robustos para lidar com eventos hidrológicos extremos. A incorporação de dados mais detalhados e técnicas de modelagem avançadas tem o potencial de superar as limitações observadas, ampliando a aplicabilidade e a precisão dos modelos hidrológicos. Apesar das dificuldades e resultados limitados, este estudo reforça a importância da modelagem hidrológica como uma ferramenta indispensável para o avanço na compreensão e gestão dos recursos hídricos. A complexidade das bacias desafia os modelos atuais, mas também cria oportunidades para inovações que podem transformar a forma como mitigamos os riscos e promovemos a resiliência diante das mudanças climáticas.

## Referências

ANA. **Rios**. 2012. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/a01764d3-4742-4f7d-b867-01bf544dde6d>. Acesso em: 05 jan. 2025.

ANA. **Nota Técnica nº 46/2018/SPR – Produção de base vetorial com o Curve Number (CN) para BHO 2014 (BHO\_CN)**. 2018. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d1c36d85-a9d5-4f6a-85f7-71c2dc801a67>. Acesso em: 15 dez. 2024.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. **Atlas Digital de Desastres no Brasil**. Brasília: MIDR, 2023. Disponível em: <https://atlasdigital.mdr.gov.br/paginas/index.xhtml>. Acesso em: 15 jan. 2025.

BUYTAERT, W. *et al.* Citizen science in hydrology and water resources: opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development. **Frontiers in Earth Science**, 2, 26, p. 1-21, oct. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/feart.2014.00026>. Acesso em: 20 nov. 2024.

CAHYONO, C.; ADIDARMA, W. K. Influence analysis of peak rate factor in the flood events' calibration process using HEC–HMS. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 4, p. 1705–1722, 2019.

CBH–ALPA. **Plano da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema – (UGRHI 14) 2016-2027**. Relatório 1 - Informações Básicas. [S.l.]: 2016. 243 p. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/CBH-ALPA/12024/relatorioalparevisaodeze mbrov5.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2024.

CBH–ALPA. **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas do Estado de São Paulo**. Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – Alto Paranapanema – UGRHI 14. Piraju, São Paulo, 2023. 197p. Disponível em: [https://cbhalpa.org/wp-content/uploads/2023/11/RS\\_2023\\_ab\\_2022\\_UGRHI\\_14\\_v2.pdf](https://cbhalpa.org/wp-content/uploads/2023/11/RS_2023_ab_2022_UGRHI_14_v2.pdf). Acesso em: 15 dez. 2024.

CILTO, G. G. *et al.* Uso da ciência cidadã para identificação de precipitações potencialmente causadoras de inundações: estudo de caso na Bacia do Alto Paranapanema. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 25., 2023, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: ABRHidro, 2023. p. 1-10. Disponível em: <https://anais.abrhydro.org.br/job.php?Job=15634>. Acesso em: 20 nov. 2024.

COLLISCHONN, W. *et al.* **Métodos simples para estimar vazões de referência e sua incerteza**. Porto Alegre: ABRHidro, 2023.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: ABRH, 2015.

CURY, J. F. **A gestão integrada de Bacias Hidrográficas: a abertura de uma oportunidade para o desenvolvimento sustentável do Alto Paranapanema.** 2005. Tese (Doutorado em Estruturas Ambientais Urbanas) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.16.2006.tde-21092006-101811>. Acesso em: 15 fev 2025.

DOTTO, A. V. E.; ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R. Simulação de cenários hidrológicos na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari/RS com a utilização do modelo SWAT. **RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 60, p. 159, 2024. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/94658>. Acesso em: 15 fev. 2025.

EM-DAT. **Public EM-DAT.** CRED/UCLouvain, Bruxelas, Bélgica, 2024. Disponível em: [www.emdat.be](http://www.emdat.be). Acesso em: 20 nov. 2024.

FAYAL, M. A. A. **Previsão de vazão por Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.12169>. Acesso em: 10 fev. 2025.

G1. **Zona rural fica debaixo d'água há dias após cheia em encontro de dois rios.** G1 – Itapetininga e Região, 2016a. Disponível em: <https://g1.globo.com/sao-paulo/itapetininga-regiao/noticia/2016/01/zona-rural-fica-debaixo-d-agua-ha-dias-apos-cheia-em-encontro-de-dois-rios.html>. Acesso em: 15 fev. 2025.

G1. **Pesquisadores fazem levantamento de impactos causados por inundação.** G1 – Itapetininga e Região, 2016b. Disponível em: <https://g1.globo.com/sao-paulo/itapetininga-regiao/noticia/2016/01/pesquisadores-fazem-levantamento-de-impactos-causados-por-inundacao.html>. Acesso em: 15 fev. 2025.

GALVÃO, P. R. *et al.* Uso combinado de dados de ciência cidadã e imagens de satélites para obtenção de dados para reconstruções de eventos históricos de inundação. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 25., 2023, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: ABRHidro, 2023. p. 1-10. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=15633>. Acesso em: 20 nov. 2024.

HUCKE, A. T. S. *et al.* Assessment of climate change impacts on rainfall and streamflow in the Alto Paranapanema Basin, Brasil. **Journal of Water and Climate Change**, v. 15, n. 5, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.549>. Acesso em 05 dez. 2024.

IBGE. **Divisão Hidrográfica Nacional – DHN250.** 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/31653-bacias-e-divisoes-hidrograficas-do-brasil.html>. Acesso em: 05 jan. 2024.

IBGE. **Malha Municipal.** 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 05 jan. 2025.

IGC. **Limite de UGRHI 1:1.000.000.** 2011. Disponível em: <https://datageo.ambiente.sp.gov.br>. Acesso em: 05 jan. 2024.

IPCC. Summary for Policymakers. *In: Climate Change 2023: Synthesis Report*. IPCC, Genebra, Suíça, 2023a, pp. 1-34. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. Acesso em: 20 nov. 2024.

IPCC. Sumário para Formuladores de Políticas. *In: Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese*. IPCC, Genebra, Suíça, 2023b, pp. 1-34. Versão traduzida pelo Governo do Brasil e pelo Pacto Global da ONU. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/>. Acesso em: 20 nov. 2024.

KIDD, C. *et al.* So, how much of the earth's surface is covered by rain gauges? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98, p. 69–78, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00283.1>. Acesso em: 20 nov. 2024.

LAIPELT, L. *et al.* ANADEM: A Digital Terrain Model for South America. *Remote Sensing*, v. 16, n. 13, p. 2321, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/13/2321>. Acesso em: 10 dez. 2024.

LIMA, L. S. **Implementação de um modelo hidrológico distribuído na plataforma de modelagem Dinamica EGO**. 2011. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MPBB-8JPPT4>. Acesso em: 15 dez. 2024.

LOU, R. F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabana/RJ**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MARILHO FILHO, G. M. *et al.* Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 6, n. 2, p. 35–47, 2013. Disponível em: <https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/view/268>. Acesso em: 15 fev. 2025.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidrológica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/2576>. Acesso em: 15 dez. 2024.

OLIVEIRA, R. F. *et al.* Modelagem hidrológica utilizando o modelo de grandes bacias MGB-IPH: estudo de caso da Bacia hidrográfica do alto Teles Pires. *In: SEMINÁRIO DA REDE AGROHIDRO*, 4., 2016, Brasília. **Água e agricultura: incertezas e desafios para a sustentabilidade frente às mudanças do clima e do uso da terra: Anais [...]**. Brasília: Embrapa Cerrados, 2016. p. 168-174. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1060174>. Acesso em: 10 fev. 2025.

PEREIRA, M. A. F.; BARBIEIRO, B. L.; QUEVEDO, D. M. Importância do monitoramento e disponibilização de dados hidrológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos. *Sociedade e Natureza*. v. 23, n. 22. p. 308-320, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/jQSnLRKrRypfvm5nZWmKtxr/>. Acesso em: 20 nov. 2024.

PETRY, I. *et al.* **ANA Data Acquisition V 1.0**. Complemento do QGIS. 2021. HGE, IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/ana-data-acquisition/>. Acesso em: 05 jan. 2025.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 43–60, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200004>. Acesso em: 10 dez. 2024.

SANTOS, J. C. **Comparação entre a área inundável obtida por imagens óticas de satélite e simulações realizadas no HEC-RAS e HAND model: estudo de caso de uma sub-bacia do Alto Paranapanema**. Dissertação (Mestrado em Desastres Naturais) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, São José dos Campos, 2023. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/250931>. Acesso em: 15 fev. 2025.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5-18, 2005. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=26&SUMARIO=440>. Acesso em: 10 dez. 2024.

SOUZA, V. B.; DAL FARRA, R. A. Estudo do software HEC-HMS para aplicação da modelagem matemática hidrológica em uma bacia hidrográfica. **Revista de Iniciação Científica da ULBRA**, n. 15, p. 116-128, 2017. Disponível em: <http://www.periodicos.ulbra.br/index.php/ic/article/view/3406>. Acesso em: 20 dez. 2024.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2001.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2005.

USACE. **HEC-HMS**. 2024. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. Acesso em: 20 dez. 2024.

USACE. **Model Classification**. 2025. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/primer-on-models/model-classification>. Acesso em: 10 fev. 2025.

WMO. **Atlas of Mortality and Economic Losses From Weather, Climate and Water Extremes (1970-2019)**. WMO – No. 1267, 2021, 90 p. Disponível em: <https://library.wmo.int/idurl/4/57564>. Acesso em: 20 nov. 2024.

XAVIER, A C. *et al.* New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390–8404, 2022.