

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO TAQUARI-ANTAS (RS) PARA ESTIMATIVA DO TEMPO DE RETORNO DAS VAZÕES ASSOCIADAS AO EVENTO DE MAIO DE 2024**

*João Pedro Oliveira Emerich <sup>1</sup> ; Francisco Eustáquio Oliveira e Silva <sup>2</sup>*

**Resumo:** Entre abril e maio de 2024, o estado do Rio Grande do Sul enfrentou uma das maiores catástrofes climáticas de sua história devido a eventos extremos de precipitação, com acumulados de até 700 mm em algumas cidades. O evento resultou em inundações que afetaram 478 municípios, impactaram quase 2,4 milhões de pessoas e causaram 183 óbitos. Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e aplicar um modelo hidrológico contínuo e semi-distribuído para a bacia do rio Taquari-Antas (RS), a fim de simular a cheia de maio de 2024 e estimar o tempo de retorno das vazões máximas associadas a esse evento. A metodologia incluiu a aquisição de dados observados de precipitação, evapotranspiração e vazão, a calibração e validação do modelo no software HEC-HMS, e a análise de frequência por meio da distribuição probabilística de Gumbel, com o uso de dados observados e simulados. Os resultados demonstraram que o modelo foi eficaz para representar as dinâmicas de vazão em condições normais, capturando bem os picos anuais. No entanto, verificaram-se limitações na modelagem do evento extremo ocorrido em maio de 2024, devido à superestimação das vazões simuladas e dificuldades na adequação das distribuições probabilísticas. A análise revelou tempos de retorno elevados e pouco realistas para o evento de 2024, indicando necessidade de aprimoramentos na qualidade dos dados de entrada e técnicas de ajuste.

**Palavras-Chave** – Modelagem hidrológica; Análise de frequência; Tempo de retorno

**Abstract:** Between April and May 2024, the state of Rio Grande do Sul experienced one of the most severe climate disasters in its history due to extreme precipitation events, with accumulations reaching up to 700 mm in some cities. The event resulted in floods that affected 478 municipalities, impacted nearly 2.4 million people, and caused 183 fatalities. In this context, the present study aims to develop and apply a continuous and semi-distributed hydrological model for the Taquari-Antas River Basin (RS), in order to simulate the May 2024 flood and estimate the return period of the peak flows associated with this event. The methodology included the acquisition of observed data on precipitation, evapotranspiration, and streamflow, the calibration and validation of the model using the HEC-HMS software, and a frequency analysis based on the Gumbel probability distribution using both observed and simulated data. The results showed that the model was effective in representing streamflow dynamics under normal conditions, accurately capturing annual peak flows. However, limitations were observed in modeling the extreme event of May 2024, due to overestimation of the simulated flows and difficulties in fitting probabilistic distributions. The analysis revealed unrealistically high return periods for the 2024 event, indicating the need for improvements in input data quality and adjustment techniques.

**Keywords** – Hydrological modeling; Frequency analysis; Return period

## INTRODUÇÃO

Entre o final de abril e início de maio de 2024 o estado do Rio grande do Sul vivenciou uma das maiores catástrofes climáticas de sua história, causada por eventos extremos de precipitação. Segundo boletim extraordinário publicado no final de maio pelo Governo do Estado do Rio Grande do Sul (2024), em 6 dias, entre 27 de abril e 2 de maio, choveu cerca de 400 mm em várias cidades gaúchas e algumas chegaram a registrar uma precipitação acumulada de 700mm, o que corresponde a um terço do que costuma chover em um ano na região.

Tal evento levou ao aumento das vazões e extravasamento do leito de diversos rios. No dia 5 de maio, o lago Guaíba, localizado nas redondezas da capital Porto Alegre, atingiu um nível d'água de 5,37 metros, superando cheias históricas registradas em 2023 e 1941 (Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2024). Ainda, em agosto de 2024, a Defesa Civil atualizou os dados sobre as consequências da enchente, reportando que 478 dos 497 municípios do estado foram afetados, com quase 2,4 milhões de pessoas diretamente impactadas, 183 óbitos confirmados e dezenas de desaparecidos.

A ocorrência de enchentes no Rio Grande do Sul evidenciou a vulnerabilidade de algumas bacias hidrográficas do estado a precipitações extremas e o impacto severo que esses eventos podem causar em áreas urbanas e rurais, com prejuízos econômicos, sociais e ambientais. Tudo isso reforça a importância de se atualizar constantemente os parâmetros e métodos de análise de precipitação e de cheias, visto que eventos históricos podem fornecer dados valiosos para melhorar as práticas de gerenciamento de bacias hidrográficas (COLLISCHONN *et al.*, 2024).

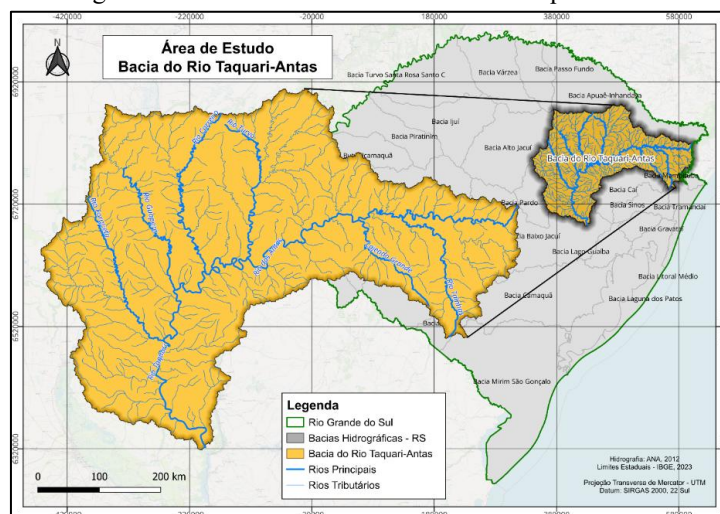
Embora as chuvas de 2024 tenham causado estragos em todo o estado, a região hidrográfica do Guaíba, situada na porção centro-leste do Rio Grande do Sul, foi uma das mais afetadas. A bacia do rio Taquari-Antas é uma das principais áreas de contribuição dessa região hidrográfica, com cerca de 26.430 km<sup>2</sup> de extensão e população estimada de 1.383.442 habitantes (IBGE, 2020). Alguns dos municípios com maior número de óbitos devido a cheia de 2024 estão localizados na bacia do rio Taquari-Antas, como Bento Gonçalves, Caxias do Sul, Cruzeiro do Sul e Lajeado (ZANLORENSSI *et al.*, 2024).

Com isso, percebe-se a necessidade de um estudo aprofundado das dinâmicas hidrológicas da bacia para melhor compreensão e preparação para futuros eventos. O presente trabalho tem como objetivo aplicar um modelo hidrológico contínuo e semi-distribuído para a bacia do Rio Taquari-Antas (RS), a fim de simular a cheia ocorrida em maio de 2024 e, por meio de análise de frequências, estimar o tempo de retorno associado às vazões máximas geradas por esse evento.

## ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Taquari-Antas, localizada no nordeste do estado do Rio Grande do Sul, ocupa uma área de aproximadamente 26.430 km<sup>2</sup>, o que representa cerca de 9% do território estadual (SEMA-RS, 2024). Inserida na Região Hidrográfica do Guaíba, a bacia é composta por 119 municípios, incluindo cidades como Antônio Prado, Veranópolis, Bento Gonçalves, Caxias do Sul, Estrela e Triunfo. A população total da bacia estimada é de 1.383.442 habitantes, sendo 78% em áreas urbanas e 22% em áreas rurais (IBGE, 2020). Seus limites territoriais incluem as bacias do Apuaê-Inhandava ao norte, Alto Jacuí e Pardo a oeste, Baixo Jacuí, Caí e Sinos ao sul, e a Leste as escarpas da Serra Geral (SEMA-RS, 2024). A Figura 1 apresenta a bacia do rio Taquari-Antas.

Figura 1 – Área de Estudo – Bacia do rio Taquari-Antas

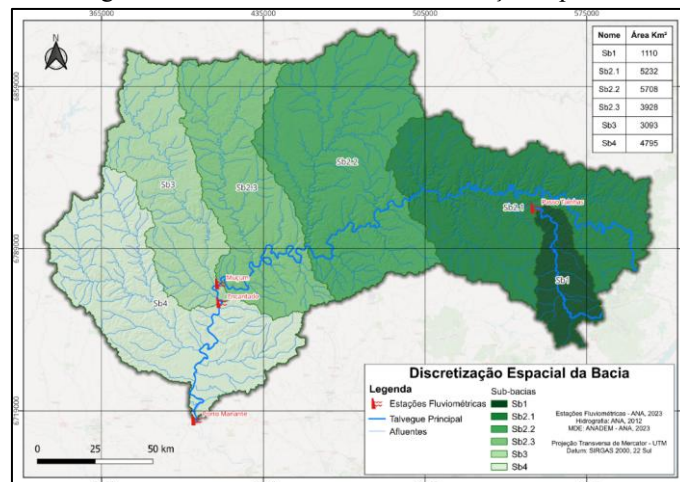


Fonte: Autor, 2024.

A área de estudo, em que efetivamente será realizada a modelagem hidrológica, não compreende completamente a bacia do Taquari-Antas, não cobrindo o final da porção sul da bacia. Essa decisão foi limitada devido a indisponibilidade de pontos de monitoramento fluvial no exutório da bacia, que serão usados na calibração e estimativa de parâmetros do modelo.

Além disso, a bacia em estudo possui uma extensa área de contribuição, sendo necessário à sua discretização espacial em sub-bacias para representar melhor as heterogeneidades da região e a variabilidade da precipitação e da evapotranspiração. O principal critério para a divisão foi a existência de pontos de monitoramento de vazão com uma série histórica mínima de 10 anos em um intervalo de tempo comum para todos os pontos, para que fosse possível calibrar o modelo para os máximos anuais. Logo, foram definidos quatro pontos (exutórios) para a delimitação das sub-bacias nas seguintes estações fluviométricas: Passo Tainhas, Muçum, Encantado e Porto Mariante. Entretanto, a área incremental entre Passo Tainhas e Muçum é muito grande, o que levou a divisão dessa sub-bacia em três outras que pudessem representar a variação das características da bacia e da chuva. A Figura 2 apresenta a bacia modelada com a divisão em sub-bacias proposta e suas respectivas áreas de drenagem incremental.

Figura 2 – Bacia modelada e discretização espacial



Fonte: Autor, 2024.

## METODOLOGIA

### Aquisição de dados observados

Em modelagens hidrológicas contínuas, os principais dados de entrada são as séries temporais de precipitação e evapotranspiração, além de dados históricos de vazão para calibração e validação do modelo. Para o período de 1961 a 2020, foram utilizados dados do produto Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD), que fornece informações meteorológicas em grade ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) obtidas por interpolação de dados observacionais de pluviômetros e estações meteorológicas (Xavier *et al.*, 2022). Já os dados de precipitação referentes ao período de 2020 a 2024 foram obtidos do produto Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG), com resolução espacial de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  e resolução temporal de 30 minutos.

A evapotranspiração, obtida do produto BR-DWGD, foi representada por meio da média mensal histórica para cada sub-bacia, utilizada diretamente nas simulações hidrológicas. Quanto aos dados fluviométricos, realizou-se um levantamento dos pontos de monitoramento existentes na bacia com base em informações do Serviço Geológico do Brasil (SGB). As séries de vazão foram obtidas no portal Hidroweb, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), sendo selecionadas as maiores séries históricas comuns entre os postos. Dentre as estações avaliadas, apenas quatro apresentaram conjuntos de dados suficientemente completos e confiáveis para aplicação no modelo: Passo Tainhas, Muçum, Encantado e Porto Mariante.

### Modelo hidrológico

A construção do modelo foi feita através do HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System), que é um software desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers para simular processos hidrológicos em bacias hidrográficas. Dentre os disponíveis pelo HEC-HMS, o Loss Method (Método de Perda) escolhido, que permite estimar a infiltração e o volume de água que efetivamente contribui para o escoamento superficial, foi o Deficit and Constant Loss (Déficit e Perda Constante). Esse método de perda considera uma única camada de solo para contabilizar a variação do armazenamento de água. Quando associado a um método de dossel, que retira água do solo por evapotranspiração, permite uma simulação contínua.

Apesar do interesse principal ser a simulação dos picos de vazão anuais, optou-se pela utilização de um modelo contínuo devido à menor dependência de ajustes manuais das condições iniciais, como a umidade do solo, a recarga do lençol freático e o escoamento de base. Esses fatores, especialmente em bacias de grande extensão, têm uma influência significativa na magnitude dos picos de vazão.

O modelo funciona da seguinte forma: a precipitação incide primeiramente sobre a vegetação (Simple Canopy) ou sobre o solo/depressões (Simple Surface), armazenando a água nesses reservatórios, que pode ser retirada por evapotranspiração. Quando estes atingem sua capacidade, uma parte da água infiltra (Deficit and Constant Loss) e a outra esco superficialmente. A transformação de chuva efetiva em vazão é realizada pelo método do Clark Unit Hydrograph.

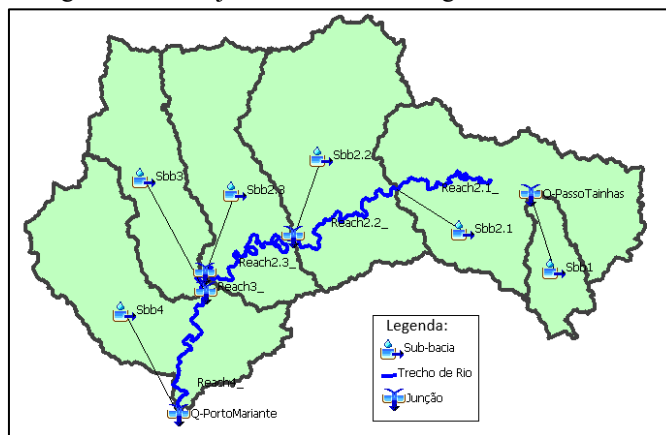
Da parcela de água que infiltra, uma parte fica armazenada na camada superior do solo, que pode ser removida por evapotranspiração ou por percolação. Quando este reservatório atinge sua capacidade, ou seja, o solo fica saturado, toda água que incide sobre a superfície se torna escoamento superficial. Do volume de água percolado, uma parte é perdida para recarga do aquífero profundo e outra se torna escoamento de base (Linear Reservoir). Por fim, a propagação de vazões em trechos de rios foi feita com o método Muskingum-Cunge.

Os parâmetros iniciais do modelo hidrológico foram estimados com base em características físicas da bacia do rio Taquari-Antas, utilizando informações de solo, relevo e métodos empíricos



implementados no HEC-HMS. Na Figura 3 a seguir está apresentado o arranjo final do modelo hidrológico no HEC-HMS.

Figura 3 – Arranjo do modelo hidrológico no HEC-HMS



Fonte: HEC-HMS, 2025.

### Calibração, validação e simulação

Para o presente estudo, a calibração foi feita de forma iterativa e manual no HEC-HMS, variando os parâmetros do modelo para entender suas influências no hidrograma e analisando a aderência dos resultados da simulação aos dados observados. Para avaliar a qualidade da calibração, foram usadas duas medidas de desempenho que indicam o erro entre os valores simulados e observados, as quais são: coeficiente de eficiência do modelo Nash-Sutcliffe (NSE) e coeficiente de eficiência de Kling-Gupta (KGE).

Foram encontrados três períodos de dados de vazões medidas comum aos quatro pontos de monitoramento, que são os exutórios de cada sub-bacia. 1961 a 1970 (P1), 1983 a 1994 (P2) e 2002 a 2014 (P3). Por ser o mais recente e, conseqüentemente, representar melhor as condições da bacia atualmente, o P3 foi escolhido para calibrar o modelo. Os outros períodos foram utilizados apenas para validação.

Primeiramente, cada sub-bacia foi calibrada de forma individual. O modelo utilizado para essa calibração consistiu em uma bacia hidrográfica, um trecho de rio, uma junção no exutório e uma entrada de vazões a montante, representada pelas vazões observadas. Esse processo foi repetido para todas as sub-bacias, com algumas exceções, como a sub-bacia 1, localizada mais a montante, que não inclui trecho de rio nem entrada de vazões a montante. De forma geral, cada sub-bacia foi calibrada individualmente conforme descrito.

Para iniciar o processo de calibração, foi selecionado um único ano do período P3, realizando-se uma simulação inicial com os parâmetros estimados previamente. O foco da calibração foi a maior cheia registrada no ano escolhido. Primeiramente, ajustaram-se simultaneamente os parâmetros do método de perda e do método de transformação, buscando aproximar o hidrograma simulado ao observado, considerando o volume total, a forma geral, a vazão de pico e o tempo de pico. Em seguida, calibraram-se os parâmetros relacionados ao escoamento de base, com o objetivo de ajustar as condições antes da subida do hidrograma, a recessão e o trecho após a descida. Nessa etapa, também se ajustou a taxa constante do método de perda, devido à sua influência direta sobre o escoamento de base.

Posteriormente, o modelo foi executado para todo o período P3, e os picos anuais simulados foram avaliados. Os resultados completos da modelagem foram organizados em uma planilha no Excel para a aplicação dos testes de aderência descritos previamente. Também foi realizada a análise comparativa entre os máximos anuais simulados e observados, refinando o ajuste para uma melhor correspondência. Os parâmetros do modelo foram ajustados até que se obtivesse uma boa concordância nos testes estatísticos tanto para o período completo quanto para os picos anuais. Esse procedimento foi repetido para as quatro sub-bacias. Por fim, o modelo final foi executado para o período completo com dados de precipitação disponíveis, de 1961 a 2019 para o BR-DWGD (Xavier, 2022) e de 2001 a 2024 para o IMERG.

### **Análise de frequência**

A análise de frequência de variáveis hidrológicas é uma técnica amplamente empregada para relacionar a magnitude de eventos extremos, como cheias e secas, com sua frequência de ocorrência. Esse método permite estimar valores críticos de uma variável de interesse, fornecendo informações essenciais para projetos de infraestrutura e gestão de recursos hídricos, como a definição de vazões de projeto para barragens, pontes e sistemas de controle de cheias, além de permitir a estimativa de vazões características com diferentes tempos de retorno ou o contrário (Naghetini e Pinto, 2007).

No presente trabalho, foi realizada uma análise de frequência local para cada uma das sub-bacias, que se baseia no uso de dados de vazão em um único ponto. A análise foi conduzida com o auxílio do software ALEA (Análise de Frequência Local de Eventos Hidrológicos Anuais), que executa de forma integrada as etapas necessárias para fazer a análise de frequência. A série histórica utilizada consiste nos máximos anuais de vazão observadas e modeladas, considerando como referência o ano civil. Cada valor representa a maior vazão registrada em um ano específico, caracterizando-se como uma variável aleatória.

A modelagem probabilística foi conduzida com o ajuste de funções de densidade de probabilidade (FDP) aos dados. As FDPs são expressões matemáticas que descrevem a probabilidade associada à ocorrência de diferentes magnitudes da variável de interesse. Segundo Naghetini e Pinto (2007), não existe um consenso entre os especialistas para escolher qual função deve ser usada em cada caso. No contexto deste estudo, foram analisadas as distribuições Log-Normal de 2 parâmetros, Gumbel e Generalizada de Valores Extremos (GEV). Para escolher qual função será utilizada, se avaliou graficamente qual delas se aderiu melhor a distribuição de probabilidade empírica dos dados observados, utilizando a posição de plotagem de Cunnane. O processo de estimação dos parâmetros dessas distribuições foi realizado pelo método dos Momentos-L (MML), que oferece maior robustez para o ajuste de distribuições em dados hidrológicos ao estarem menos sujeitos a flutuações amostrais em relação ao método dos Momentos convencional (Naghetini e Pinto, 2007).

A comparação da aderência das funções de densidade de probabilidade foi feita para toda a série histórica disponível de vazões observadas. Com a função definida, as análises de frequência também foram executadas para os máximos anuais simulados. Para essa análise foram consideradas as vazões modeladas com o modelo meteorológico que utilizou a precipitação do BR-DWGD para o período de 1961 a 2019.

Para comparar os modelos probabilísticos das vazões observadas e modeladas, foi observada a sobreposição dos intervalos de confiança das FDPs dos dois modelos. Os intervalos de confiança refletem a variabilidade inerente ao processo de estimar parâmetros de uma distribuição de probabilidade a partir de amostras finitas (Naghetini e Pinto, 2007).

Por fim, após o ajuste das distribuições de probabilidade e a seleção da função com melhor aderência aos dados, seguido da estimativa dos parâmetros no software ALEA, a distribuição de

probabilidade escolhida foi utilizada para estimar o tempo de retorno da cheia ocorrida em maio de 2024, simulada com base nos dados de precipitação do IMERG.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Calibração e validação

A Tabela 1 fornece uma visão geral dos testes estatísticos que avaliaram a qualidade da calibração para os três períodos.

Tabela 1 – Resultados dos testes estatísticos para avaliação da qualidade da calibração

NSE				KGE			
Calibração		Validação		Calibração		Validação	
Bacia	P3	P2	P1	Bacia	P3	P2	P1
<b>Sb1</b>	0,710	0,764	0,577	<b>Sb1</b>	0,681	0,855	0,327
<b>Sb2</b>	0,707	0,772	0,809	<b>Sb2</b>	0,733	0,734	0,669
<b>Sb3</b>	0,906	0,899	0,924	<b>Sb3</b>	0,860	0,866	0,866
<b>Sb4</b>	0,906	0,904	0,877	<b>Sb4</b>	0,921	0,941	0,763

Fonte: Autor, 2025.

Para a sub-bacia 1, tanto o NSE, quanto o KGE apresentaram desempenhos razoáveis para a calibração (em torno de 0,69), bons para a validação em P2 e uma queda significativa para a validação em P1. Como a sub-bacia 1 está localizada a montante da área de estudo e possui uma área de drenagem pequena (mais sensível a mudanças na bacia) e P1 é o período mais antigo, alterações nas características físicas da bacia podem justificar essa diferença significativa entre P1 e os demais. Outra hipótese é que nesse período podem ter ocorrido eventos específicos que o modelo não conseguiu capturar com precisão.

Em relação a sub-bacia 2, o modelo demonstrou resultados bons e consistentes para NSE e KGE em P3 e P2. Entretanto, para P1 houve um declínio dos resultados do KGE em relação ao NSE. Tal acontecimento pode decorrer do fato de o KGE avaliar o viés e a variabilidade, além da correlação entre os valores simulados e observados. Enquanto o NSE é mais sensível a erros grandes, como nos picos, o KGE pode piorar com diferenças entre as médias das séries observadas e simuladas ou entre os padrões de oscilação das vazões. Isso sugere que, embora o modelo tenha capturado razoavelmente os picos, pode não ter capturado com precisão, por exemplo, eventos de seca que alteraram a variação das vazões. Ademais, o NSE pode não perceber um erro que é compensado pela média.

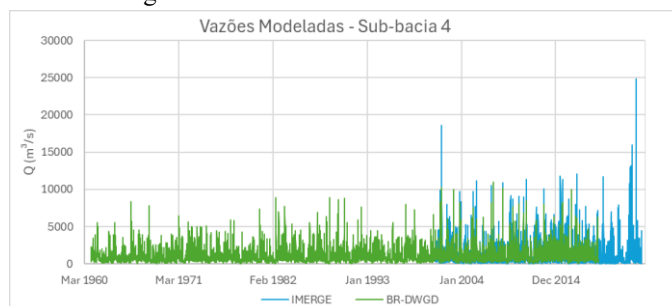
Acerca das sub-bacias 3 e 4, a calibração de ambas expressou ótimas métricas, com resultados excelentes para a sub-bacia 3. Para a sub-bacia 4 os coeficientes foram ótimos para todos os períodos, com uma pequena queda do KGE no P1, o que pode indicar o mesmo problema ocorrido na sub-bacia 2.

### Simulação

Para a simulação e análise de frequência serão apresentados os resultados no exutório da sub-bacia 4, onde está localizada a estação fluviométrica de Porto Mariante, devido a sua importância no contexto da bacia do rio Taquari-Antas. Esse ponto se encontra a jusante do município de Lajeado, que foi uma das cidades mais afetadas e com um dos maiores números de óbitos.

A Figura 4 a seguir apresentam os resultados completos da simulação com os dados de precipitação do IMERG e do BR-DWGD.

Figura 4 – Vazões modeladas – Sub-bacia

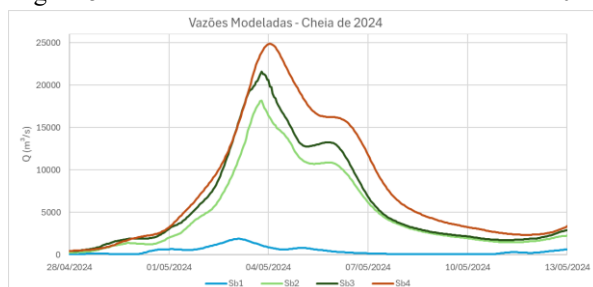


Fonte: Autor, 2025.

Após a análise dos resultados do modelo, percebe-se que houve uma superestimação considerável das vazões simuladas com os dados de precipitação do IMERG em relação aos dados do BR-DWGD. Não é possível afirmar que a cheia de maio de 2024 também foi superestimada, uma vez que não existem dados simulados com a precipitação do BR-DWGD para esse ano e nem dados de vazões observadas. Entretanto, é possível que os valores modelados para maio de 2024 carreguem a mesma característica de superestimação dos outros anos.

O gráfico da Figura 5 ilustra a cheia modelada para as bacias do rio Taquari-Antas em maio de 2024. A vazão de pico para esse evento na sub-bacia 4 foi de 24874 m³/s.

Figura 5 – Vazões modeladas – Cheia de maio de 2024

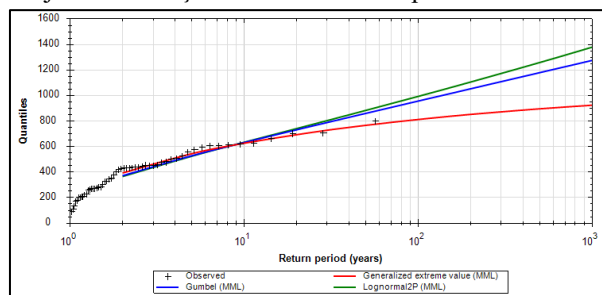


Fonte: Autor, 2025.

## Análise de frequência

A Figura 6 abaixo apresenta o ajuste das funções de densidade de probabilidade para os dados observados na sub-bacia 4.

Figura 6 – Ajuste das funções de densidade de probabilidade – Sub-bacia 4



Fonte: ALEA, 2025.

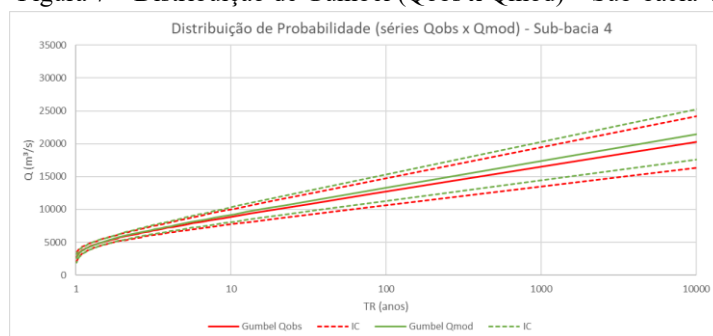
Através da análise visual dos resultados, a distribuição que ficou mais aderente foi a GEV (Generalizada de Valores Extremos). Contudo, o parâmetro de forma da distribuição GEV assumiu



valores positivos, ou seja, ela está definida apenas para  $y < (\beta + \alpha)/k$ , onde  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $k$  denotam, respectivamente, os parâmetros de escala, posição e forma (Naghettini e Pinto, 2007). Ou seja, a distribuição é limitada para valores máximos. Dessa forma, apesar da aderência pior, foi escolhida a distribuição de probabilidade de Gumbel para seguir com as análises de frequências.

A Figura 7 demonstra a distribuição Gumbel, com seus intervalos de confiança, dos modelos estatísticos das vazões observadas e modeladas.

Figura 7 – Distribuição de Gumbel (Qobs x Qmod) – Sub-bacia 4



Fonte: Autor, 2025.

Conforme apresentado na figura, para a sub-bacia 4 os modelos estatísticos são consistentes. As vazões estimadas com os parâmetros ajustados no modelo de vazões observadas diferem cerca de 5%, até o TR de 1000 anos, quando comparado com o modelo de vazões observadas. Isso revela que os modelos probabilísticos das vazões modeladas para a sub-bacia 4 são coerentes com o modelo de vazões observadas. Finalmente, a partir dos parâmetros ajustados para a distribuição Gumbel no modelo com as vazões simulados estimou-se o tempo de retorno para a vazão de 24874 m³/s, calculando um TR de 71755 anos.

O de tempo de retorno estimados para o evento de cheia de maio de 2024 apresentou uma magnitude consideravelmente elevada, o que pode indicar uma resposta pouco realista. Este resultado reflete as limitações da análise de frequência aplicada a séries de vazões máximas anuais de extensão reduzida e a incertezas associadas à extrapolação estatística. O tamanho da amostra e as características específicas da cheia de 2024, tornam difícil ajustar uma distribuição de probabilidade que apresente uma resposta coerente, uma vez que um evento extremamente raro foge dos padrões estatísticos observados nas séries históricas. Além disso, as distribuições de probabilidade utilizadas para modelar eventos extremos têm limitações na representação de eventos com períodos de retorno muito longos, e os modelos podem não ser adequados para grandes extrapolações além do alcance dos dados observados. O erro padrão associado à estimativa dos quantis cresce conforme os períodos de retorno aumentam.

## CONCLUSÃO

A estratégia de calibração adotada para o modelo hidrológico contínuo e semi-distribuído demonstrou-se eficiente, com desempenho satisfatório na maioria das sub-bacias analisadas. A exceção foi o período de validação P1 na sub-bacia 1, que apresentou resultados insatisfatórios. No entanto, no período P2, os indicadores de qualidade mostraram bom desempenho, validando a confiabilidade do modelo para essa sub-bacia. As demais áreas da bacia apresentaram resultados entre bons e ótimos ao longo do processo de calibração e validação. De forma geral, o modelo mostrou-se eficaz na representação das dinâmicas de vazão do rio Taquari-Antas em condições normais, especialmente na identificação dos picos anuais.

A simulação utilizando dados de precipitação por satélite (IMERG), resultou em superestimativas consideráveis quando comparada aos dados interpolados de pluviômetros (BR-DWGD), evidenciando divergências relevantes entre as fontes. Essas inconsistências possivelmente influenciaram a superestimação das vazões simuladas no evento de 2024, afetando a precisão na estimativa dos tempos de retorno. A análise de frequência indicou tempos de retorno elevados e pouco realistas para o evento de 2024, refletindo não apenas as limitações dos modelos estatísticos em extrapolações longas, mas também possíveis deficiências metodológicas, como a simplificação do método de propagação hidráulica, que pode não contemplar os efeitos de inundações extremas, e o uso combinado de diferentes fontes de precipitação, que introduz incertezas adicionais.

## REFERÊNCIAS

COLLISCHONN, W.; et al. (2024). “Chuva da cheia de 2024 foi mais volumosa e intensa que a da cheia de 1941 na bacia hidrográfica do Guaíba.” Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/iph/wp-content/uploads/2024/06/Comparacao-2024-e-1941-final.pdf>. Acesso em: 15 out. 2024.

HEC-HMS - HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER - HYDROLOGIC MODELING SYSTEM. (2024). HEC-HMS Tutorials and Guides. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsguides>. Acesso em: 05 out. 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2023). Mapa pedológico. Disponível em: [https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/pedologia/vetores/escala\\_250\\_mil/versao\\_2023/](https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/vetores/escala_250_mil/versao_2023/). Acesso em: 23 dez. 2024.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É.J.A. (2007). Hidrologia Estatística. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte – MG, 552 p.

RIO GRANDE DO SUL. Conselho Permanente de Agrometeorologia Aplicada do Estado do Rio Grande do Sul. (2024). Boletim Extraordinário: Catástrofe climática no Rio Grande do Sul – maio de 2024. [S.l: s.n.], 23 maio 2024. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202405/31084753-boletim-copaaergs-extraordinario-maio-2024-final.pdf>. Acesso em: 14 set. 2024.

SEMA-RS – Secretaria do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul. (2024). Bacia Hidrográfica do Taquari-Antas. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/g040-bh-taquari-antas>. Acesso em: 30 out. 2024.

SGB – Serviço Geológico do Brasil. (2024). Bacias monitoradas. Disponível em: [https://www.sgb.gov.br/sace/index\\_bacias\\_monitoradas.php](https://www.sgb.gov.br/sace/index_bacias_monitoradas.php). Acesso em: 05 out. 2024.

XAVIER, A.C.; SCANLON, B.R.; KING, C.W.; ALVES, A.I. (2022). “New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020).” *International Journal of Climatology*, 42(16), pp. 8390–8404. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.7731>. Acesso em: 30 out. 2024.

ZANLORENSSI, G.; HEMERLY, G.; FRONER, M. (2024). “A geografia da tragédia no Rio Grande do Sul em mapas.” *Nexo Jornal*, 10 maio 2024. Disponível em: <https://www.nexojornal.com.br/grafico/2024/05/08/chuva-rio-grande-do-sul-enchente-tragedia-em-mapas>. Acesso em: 30 out. 2024.