UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL

RAFAELA CRISTINA DE OLIVEIRA

MODELOS EMPÍRICOS E DE GRANDES BACIAS PARA PREVISÃO DE CHEIAS NO RIO GRANDE DO SUL

PORTO ALEGRE
2026

RAFAELA CRISTINA DE OLIVEIRA

MODELOS EMPÍRICOS E DE GRANDES BACIAS PARA PREVISÃO DE CHEIAS NO RIO GRANDE DO SUL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito à obtenção do grau de mestre.

Orientador: Fernando Mainardi Fan
Coorientador: Juan Martín Bravo

PORTO ALEGRE
2026

CIP - Catalogação na Publicação

de Oliveira, Rafaela Cristina
MODELOS EMPÍRICOS E DE GRANDES BACIAS PARA PREVISÃO DE CHEIAS NO RIO GRANDE DO SUL / Rafaela Cristina de Oliveira. -- 2026.
146 f.
Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Coorientador: Juan Martín Bravo.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2026.

1. Previsão. 2. Inundações. 3. Modelos empíricos. 4. MGB. 5. Rio Grande do Sul. I. Mainardi Fan, Fernando, orient. II. Martín Bravo, Juan, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Rafaela Cristina de Oliveira

Modelos empíricos e de Grandes Bacias para previsão de cheias no Rio Grande do Sul

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestra.

Aprovado em: Porto Alegre, 05 de março de 2026.

Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan – IPH-UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Juan Martín Bravo – IPH-UFRGS
Coorientador

Drª. Camila Dalla Porta Mattiuzi – SGB
Examinadora

Dr. Francisco F. N. Marcuzzo – SGB
Examinador

Prof. Dr. Walter Collischonn – IPH-UFRGS
Examinador

APRESENTAÇÃO

Esta dissertação foi desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) sob a orientação do professor Fernando Mainardi Fan e coorientação do professor Juan Martin Bravo. A pesquisa foi financiada com bolsa de mestrado pela "Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior" (CAPES), de abril de 2024 a março de 2026. Ela está inserida no contexto do projeto "Aprimoramento de Sistema de Alerta de Cheias para o Rio Grande do Sul", sendo que parte dos resultados obtidos neste trabalho serão incorporados às atividades do referido projeto. Trata-se de um projeto desenvolvido em parceria entre o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS) e o Serviço Geológico do Brasil (SGB).

RESUMO

Nos anos de 2023, 2024 e 2025 ocorreram eventos históricos de inundação em várias bacias hidrográficas do estado do Rio Grande do Sul, com destaque para o ano de 2024, em que ocorreu a maior cheia já registrada no rio Guaíba, afetando milhares de pessoas. Eventos de cheia podem estar se tornando de maior magnitude e mais frequentes do que o esperado, relacionando-se com cenários de mudanças climáticas. Nesse sentido, a resiliência climática torna-se essencial para mitigar os impactos das inundações, através do investimento em medidas como os sistemas de previsão. O sistema de previsão operacional quantitativo em vigor no estado do RS, o Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE), operado pelo Serviço Geológico Brasileiro (SGB), gera previsões de níveis de curto prazo com modelos empíricos. Para horizontes de médio prazo são usados modelos de base física no estado, como o Modelo de Grandes Bacias (MGB). Uma forma de reduzir as incertezas e tornar as previsões mais confiáveis e robustas é usar ambos os modelos em conjunto. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é elaborar e aperfeiçoar modelos empíricos de previsão e avaliar estratégias para a sua integração com o modelo de grandes bacias (MGB), em localidades do RS. A metodologia é formada por alternativas de concepção dos modelos empíricos usando 6 diferentes cenários de bases de dados, a comparação dos resultados obtidos com os dois modelos em um horizonte de até 24 horas e a análise da integração dos resultados de ambos os modelos. Os resultados mostraram que as previsões geradas pelos modelos empíricos conseguiram representar os dados observados e o uso dos cenários como uma previsão probabilística mostrou-se mais vantajoso do que o uso de previsões determinísticas de algum cenário em específico. As previsões do MGB para o horizonte de 24 horas ficaram dentro dos intervalos dos modelos empíricos, e observou-se que a ancoragem nos dados observados tende a apresentar um EMA menor ao longo dos horizontes de previsão. Como principal conclusão do trabalho destaca-se que o uso combinado das previsões dos modelos empíricos com as previsões do modelo MGB cria uma previsão com uma acurácia geral maior. Isso deve-se já que a união das informações fortalece as previsões individualmente. Os modelos empíricos proporcionam mais acurácia no curto prazo enquanto o MGB possibilita entender no curto/médio prazo o comportamento dos níveis de água, possibilitando a identificação da magnitude da cheia, dia do pico, duração, entre outras informações.

Palavras-chave: inundações, modelos empíricos, MGB.

ABSTRACT

In the years 2023, 2024 and 2025, historic flooding events occurred in several river basins in the state of Rio Grande do Sul, with emphasis on the year 2024, in which the largest flood ever recorded in the Guaíba River occurred, affecting thousands of people. Flood events may be becoming of greater magnitude and more frequent than expected, relating to climate change scenarios. In this sense, climate resilience becomes essential to mitigate the impacts of floods, through investment in measures such as forecasting systems. The quantitative operational forecasting system currently in use in the state of Rio Grande do Sul, the Critical Events Warning System (Sistema de Alerta de Eventos Críticos - SACE), of the Brazilian Geological Survey (Serviço Geológico do Brasil - SGB), generates forecasts of short-term levels with empirical models. For medium-term horizons, physically-based models are used in the state, such as the Large Basin Model (MGB). One way to reduce uncertainties and make forecasts more reliable and robust is to use both models together. Thus, the objective of this work is to elaborate and improve empirical forecasting models and evaluate strategies for their integration with the large basin model (MGB) in localities of RS. The methodology is formed by alternatives for the design of empirical models using 6 different database scenarios, the comparison of the results obtained with the two models in a horizon of up to 24 hours and the analysis of the integration of the results of both models. The results showed that the predictions generated by the empirical models were able to represent the observed data and the use of the scenarios as a probabilistic prediction proved to be more advantageous than the use of deterministic predictions of a specific scenario. MGB's predictions for the 24-hour horizon were within the ranges of empirical models, and it was observed that anchoring in the observed data tends to show a lower EMA over the forecast horizons. As the main conclusion of the work, it is highlighted that the combined use of the predictions of the empirical models with the predictions of the MGB model creates a prediction with a higher overall accuracy. This is because the union of information strengthens the forecasts individually. Empirical models provide more accuracy in the short term while MGB makes it possible to understand the behavior of water levels in the short/medium term, enabling the identification of flood magnitude, peak day, duration, among other information.

Keywords: floods, empirical models, MGB.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Exemplo do processo de inundação nas cidades e na natureza. 18
Figura 2.2. Águas do Guaíba dentro da cidade de Porto Alegre na grande cheia de maio de 41. 19
Figura 2.3. Mapa com a representação da hidrografia, bacias do RSH, bacias do estado do RS e tipo de rocha presente no RS. 21
Figura 2.4. Imagens de cheias históricas nas bacias dos rios dos Sinos (cidade de São Leopoldo), Caí (cidade de São Sebastião do Caí), Uruguai (cidade de Iraí) e Taquari (cidade de Lajeado). 24
Figura 2.5. Chuva acumulada na bacia do Guaíba entre os dias 25/04/2025 e 15/05/2025. 27
Figura 2.6. Cheia dos meses de abril e maio de 2024 nas bacias dos rios Caí (cidade de São Sebastião do Caí), Guaíba (cidade de Porto Alegre), Taquari (cidade de Lajeado) e Sinos (cidade de São Leopoldo). 28
Figura 2.7. Comparação das chuvas ocorridas no estado em setembro de 2023, novembro de 2023, abril-maio de 2024 e junho de 2025 na bacia hidrográfica do Guaíba. 29
Figura 2.8. Variação da frequência de eventos de cheia na América do Sul para os TRs de 100 e 5 anos. 31
Figura 2.9. Análise das cotas do Guaíba ao longo dos anos (1900 a 2024). Fonte: Paiva et al., 2025a. 32
Figura 2.10. Falhas em medidas estruturais na região de Porto Alegre e região durante o evento de maio de 24. 34
Figura 2.11. Comportamento de medidas estruturais e não estruturais na ocorrência de pequenas e grandes cheias. 36
Figura 2.12. Exemplo de modelo hidrológico que usa o deslocamento da onda de cheia. 38
Figura 2.13. Exemplo de previsões do tipo determinística e do tipo ensemble. 40
Figura 2.14. Plataforma GloFAS com a previsão de inundação, visualizado dia 15/06/2025. 41
Figura 2.15. Boletim emitido pelo CEMADEN em 01/05/2024. 42
Figura 2.16. Bacias monitoradas no SACE do SGB. 43
Figura 2.17. Boletim emitido pelo SAH da bacia do rio Taquari em 04/09/2023 às 13h para a cidade de Muçum. 46
Figura 2.18. Exemplo de boletim hidrológico emitido pela sala de situação. 47
Figura 2.19. Previsão realizada em 08/05/2024 pelo IPH. 48
Figura 3.1. Fluxograma da metodologia aplicada no trabalho. 49
Figura 3.2. Representação do funcionamento do modelo MGB. 51
Figura 3.3. Minibacias do modelo MGB para o RSH. 52
Figura 3.4. Resumo do funcionamento do MGB previsão. 54
Figura 3.5. Pontos de previsão no Rio Grande do Sul Hidrológico. 56
Figura 3.6. Cenários utilizados na calibração dos modelos empíricos. 58
Figura 3.7. Exemplo de seleção dos eventos para os limiares de atenção, alerta e inundação. 59
Figura 3.8. Fluxograma da concepção do modelo de diferenças. 61
Figura 3.9. Estações usadas na aplicação do modelo de diferenças na bacia do rio Taquari. 63
Figura 3.10. Estações usadas na aplicação do modelo de diferenças na bacia do rio Caí. 64
Figura 3.11. Estações usadas na aplicação do modelo de diferenças na bacia do rio Uruguai. 65
Figura 3.12. Estação usada na aplicação do modelo de diferenças na bacia do rio Jacuí. 66
Figura 3.13. Estações usadas na aplicação do modelo de diferenças na bacia do rio dos Sinos. 67
Figura 3.14. Exemplo de aplicação de ancoragem em uma previsão. 69

Figura 3.15. Previsões do MGB durante o evento de novembro de 2023 na estação Encantado (parte 1) e previsões do MGB selecionando somente as primeiras 24 horas de cada previsão diária (parte 2). 70
Figura 3.16. Setas que representam os pontos do MGB usados na comparação com os modelos empíricos (parte 3) e exemplo visual das diferentes previsões (parte 4), durante o evento de novembro de 2023 na estação Encantado. 71
Figura 3.17. Possibilidades de acoplamento das previsões do MGB. 73
Figura 3.18. Exemplo de análise dos resultados por antecedência. 74
Figura 3.19. Exemplo de cálculo das métricas de diferença de pico e deslocamento de pico. 76
Figura 3.20. Representação das curvas de probabilidade acumuladas das previsões probabilísticas (primeiro gráfico) e determinísticas (segundo gráfico). Fonte: adaptado de Fan (2015)..... 77
Figura 4.1. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Taquari – parte 1. 86
Figura 4.2. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Taquari – parte 2. 87
Figura 4.3 Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Taquari – parte 3. 88
Figura 4.4. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Taquari – parte 4. 89
Figura 4.5. Boxplots com as métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Taquari. 90
Figura 4.6. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Caí – parte 1. 95
Figura 4.7. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Caí – parte 2. 96
Figura 4.8. Boxplots com as métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Caí 97
Figura 4.9. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Uruguai – parte 1. 106
Figura 4.10. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Uruguai – parte 2. 107
Figura 4.11. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Uruguai – parte 3. 108
Figura 4.12. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Uruguai – parte 3. 109
Figura 4.13. *Boxplots* com as métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Uruguai. 110
Figura 4.14. Previsão realizada com o modelo empírico na bacia do rio Jacuí. 113
Figura 4.15. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio dos Sinos. 116
Figura 4.16. Boxplots com as métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio dos Sinos. 117
Figura 4.17. Média das métricas de desempenho para cada bacia. 121
Figura 4.18. Boxplots das métricas de desempenho para os eventos de validação dos modelos empíricos, benchmark e MGB na bacia do rio Taquari (horizontes de 4 e 6 horas). 124
Figura 4.19. Boxplots das métricas de desempenho para os eventos de validação dos modelos empíricos, benchmark e MGB na bacia do rio Caí (horizonte de 10 horas). 125
Figura 4.20. Boxplots das métricas de desempenho para os eventos de validação dos modelos empíricos, benchmark e MGB na bacia do rio Uruguai (horizontes de 4, 6, 10, 15 e 17 horas). 126
Figura 4.21. Boxplots das métricas de desempenho para os eventos de validação dos modelos empíricos, benchmark e MGB na bacia do rio dos Sinos (horizonte de 12 horas). 127

Figura 4.22. Média das métricas de desempenho para os modelos empíricos, benchmark e MGB para cada bacia. 128
Figura 4.23.Resultados de EMA ao longo das antecedências. 131
Figura 4.24. EMR para diferentes antecedências na bacia do rio Taquari. 132
Figura 4.25. EMR para diferentes antecedências na bacia do rio Caí. 133
Figura 4.26. EMR para diferentes antecedências na bacia do rio Uruguai. 134
Figura 4.27. Boletim para a cidade de Encantado, no rio Taquari, utilizando somente os modelos empíricos para previsão de níveis. 135
Figura 4.28. Boletim para a cidade de Encantado, no rio Taquari, utilizando para as previsões de níveis os modelos empíricos e o modelo MGB. 136
Figura 4.29. Exemplo de tabela que pode ser incluída no boletim operacional do SGB. 136

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Informações das estações usadas para gerar previsões na bacia do rio Taquari. ... 62
Tabela 3.2. Informações das estações usadas para gerar previsões na bacia do rio Caí. ... 63
Tabela 3.3. Informações das estações usadas para gerar previsões na bacia do rio Uruguai. ... 65
Tabela 3.4. Informações da estação usada para gerar previsões na bacia do rio Jacuí. ... 66
Tabela 3.5. Informações das estações usadas para gerar previsões na bacia do rio dos Sinos. 67
Tabela 4.1. Informações sobre a calibração dos modelos empíricos da bacia do rio Taquari. . 80
Tabela 4.2. Métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Taquari – parte 1. ... 83
Tabela 4.3 Métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Taquari – parte 2. ... 85
Tabela 4.4. Informações sobre a calibração dos modelos empíricos da bacia do rio do Caí. ... 92
Tabela 4.5. Métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Caí. ... 94
Tabela 4.6. Informações sobre a calibração dos modelos empíricos da bacia do rio Uruguai. 99
Tabela 4.7. Métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Uruguai – parte 1. ... 103
Tabela 4.8. Métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Uruguai – parte 2. ... 105
Tabela 4.9. Informações sobre a calibração dos modelos empíricos da bacia do rio Jacuí. ... 111
Tabela 4.10. Métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Jacuí. ... 111
Tabela 4.11. Informações sobre a calibração dos modelos empíricos da bacia do rio dos Sinos. ... 114
Tabela 4.12. Métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio dos Sinos. ... 114
Tabela 4.13. CRPS e EMA médios por bacia. ... 119

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14

1.1 Objetivos 16

2. REFERECIAL TEÓRICO 17

2.1 Cheias e desenvolvimento urbano 17

2.2 Cheias no RS 19

2.3 Mudanças climáticas e alterações nas cheias no futuro do RS 30

2.4 Métodos para resiliência climática 33

2.5 Previsão hidrológica 37

2.5.1 Sistemas de previsão no mundo 40

2.5.2 Sistemas de previsão no Brasil a nível nacional 41

2.5.2 Sistemas de previsão no RS 44

3. METODOLOGIA 49

3.1 Modelos Usados 50

3.1.1 Modelos empíricos 50

3.1.2 MGB 51

3.2 Experimentos realizados 54

3.2.1 Concepção de modelos empíricos 55

3.2.2 Comparação das previsões de curto prazo do modelo empírico com as previsões emitidas usando o modelo MGB 67

3.2.3 Acoplamento de resultados dos modelos de curto prazo com previsões de médio prazo obtidas com o modelo MGB. 71

3.3 Métricas de verificação 74

4. RESULTADOS 78

4.1 Modelos empíricos 78

4.1.1 Bacia do rio Taquari 79

4.1.2 Bacia do rio Caí 91

4.1.3 Bacia do rio Uruguai 98

4.1.4 Bacia do rio Jacuí 111

4.1.5 Bacia do rio dos Sinos 113

4.1.6 Considerações gerais sobre os modelos empíricos 118

4.2 Comparação das previsões de curto prazo dos modelos empíricos com o modelo MGB 122

4.3 Acoplamento de resultados dos modelos de curto prazo com previsões de médio prazo obtidas com o modelo MGB 129

4.4 Comunicação das previsões 135

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 137
6. REFERÊNCIAS.....142

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos ocorreram grandes eventos de inundação em várias bacias hidrográficas do estado do Rio Grande do Sul. No ano de 2023 destacam-se as cheias históricas ocorridas nos meses de setembro e novembro na bacia do rio Taquari (Moraes et al., 2024) e no mês de novembro na bacia do rio Caí (SGB, 2024). A bacia do rio Uruguai também foi afetada em novembro, registrando a terceira maior enchente da história de São Borja até aquele momento (Mattiuzi e Matos, 2023). Esses eventos causaram muita destruição por onde passaram, principalmente na bacia do rio Taquari, onde o aumento dos níveis dos rios foi muito rápido, levando a perda de vidas.

Já nos meses de abril e maio de 2024 as cheias anteriores foram ultrapassadas e eventos mais fortes foram registrados na bacia que drena para a Laguna dos Patos, impactando também na bacia do rio Uruguai. As maiores precipitações ocorreram na região que drena para o rio Guaíba, onde destacam-se as bacias dos rios Pardo e Pardinho, Caí, Taquari, Sinos e Jacuí como fortemente afetadas. Os grandes acumulados de chuvas geraram cheias simultâneas nesses rios, fazendo com que o rio Guaíba registrasse níveis históricos, superando a grande cheia de 1941 (Collischonn et al., 2025). O desastre afetou diretamente centenas de milhares de pessoas, causando a inundação de mais de 15. 000 Km², fazendo 182 vítimas fatais e deixando 29 desaparecidas, três meses após a ocorrência do evento (Collischonn et al., 2024).

Em 2025, o estado do Rio Grande do Sul voltou a ser impactado por novos eventos de cheia, desta vez com maior magnitude na região central, afetando em especial as bacias dos rios Uruguai e Jacuí. Nos meses de junho e julho municípios como Santa Maria, Jaguari, Cachoeira do Sul e Agudo registraram impactos significativos, com famílias desalojadas e prejuízos materiais (G1, 2025). Também foram registrados aumentos dos níveis dos rios nas bacias dos rios Taquari, Sinos e Caí, contribuindo para a elevação dos níveis nos rios Jacuí e Guaíba, que ultrapassaram suas respectivas cotas de inundação. No rio Jacuí o evento de cheia foi comparável com as enchentes de 2024 e 1941 (Correio do Povo, 2025).

Paiva et. al (2025a) analisaram o histórico da ocorrência de inundações na bacia hidrográfica do Rio Guaíba, identificando que a década mais recente, entre os anos de 2015 e 2024, as cheias extremas podem estar se tornando maiores e mais frequentes do que o esperado. Somente nos últimos anos, a cota de inundação foi superada quatro vezes em três anos (2023, 2024 e 2025), enquanto no período anterior, ela foi superada quatro vezes em 115 anos, de 1899 e 2014. Petry et al. (2025) identificou que na região sul do Brasil existem projeções de aumento de magnitude das vazões máximas em 20%, aproximadamente, para um tempo de retorno (TR)

de 100 anos. Especificamente no estado do RS, existe um sinal de intensificação dos eventos de cheia em rios como o Taquari e o Caí, onde a vazão máxima no período histórico com TR de 5 anos pode dobrar e para o TR 100 anos pode ter um aumento 5 vezes na frequência de ocorrência no período futuro.

Diante desse cenário, a utilização de métodos para desenvolver resiliência climática torna-se essencial para mitigar os impactos das inundações, como o investimento em medidas estruturais e não estruturais. Collischonn et al. (2025) ressalta que sistemas de previsão e alerta devem existir independente de medidas estruturais ou não estruturais e que a existência de medidas estruturais não elimina a possibilidade de ocorrerem inundações, já que essas obras hidráulicas podem falhar durante a ocorrência de cheias. Além disso, em locais onde não existem medidas estruturais em operação, como nas bacias dos rios Taquari, Pardo e Caí, as previsões de níveis podem ser usadas para evacuação das populações de áreas de risco. Os sistemas de previsão são capazes de determinar quando irá ocorrer um evento de inundação, qual será o nível e a vazão gerados pelo evento, quanto tempo irá durar o evento, entre outras.

O sistema de previsão operacional quantitativo em vigor no estado, o Sistema de Alerta de Cheias (SACE), do Serviço Geológico Brasileiro (SGB), gera previsões de níveis para as bacias dos rios Taquari, Caí, Uruguai e Guaíba com base em dados medidos pelas estações telemétricas, usando modelos hidrológicos de base empírica. Conforme levantamento realizado em 2025, os modelos têm horizontes até 17 horas.

Em complemento, pesquisadores do IPH emitiram previsões de maneira emergencial durante o evento de cheia dos meses de abril e maio de 2024, para o rio Guaíba, com horizonte de 15 dias. O modelo MGB foi usado para gerar as previsões, que foram bem-sucedidas e auxiliaram na tomada de decisão (Sampaio Medeiros et al., 2025; Collischonn et al., 2025).

O uso combinado de diferentes modelos hidrológicos vem sendo estudado como uma forma de reduzir as incertezas e tornar as previsões mais confiáveis e robustas, já que permitem representar uma gama maior de trajetórias possíveis (Wetterhall et al., 2013; Dion et al., 2020). Nesse contexto, unir resultados de modelos de grande escala com modelos locais pode trazer muitos benefícios, em espacial para previsão de cheias, sendo uma área ainda pouco explorada na hidrologia (Sheikh e Coulibary, 2025).

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é elaborar e aperfeiçoar modelos empíricos de previsão e avaliar estratégias para a sua integração com o modelo de grandes bacias (MGB), em localidades do RS. Nesse trabalho os modelos empíricos são resultantes de uma adaptação

do modelo hidrológico de diferenças, permitindo que o modelo de diferenças represente as variações dos níveis dos rios usando coeficientes com sinais positivos e negativos.

O trabalho parte da hipótese de que ao usar em conjunto os dois modelos de previsão pode-se ter como resultado uma previsão que soma os benefícios do valor agregado individual de cada modelo. Isso porque espera-se que os modelos empíricos tendam a apresentar menos erros, porém o seu horizonte de previsão é reduzido, quando existem dados disponíveis. Já o modelo MGB gera previsões para um horizonte maior, porém pode agregar mais erros na geração dos níveis nas próximas horas devido a erros que se somam além dos dados de entrada de chuva e clima, como os erros do próprio modelo hidrológico.

O trabalho está organizado da seguinte forma: referencial teórico, metodologia, resultados e conclusões e recomendações. No referencial teórico são apresentadas as últimas cheias que ocorreram no RS e abordados conceitos de previsão hidrológica. Na metodologia são apresentados os modelos usados, MGB e empíricos, seguido pelo detalhamento dos experimentos realizados. Por fim, são apresentados os resultados, seguidos pelas conclusões do trabalho e recomendações para futuros trabalhos nessa linha de pesquisa.

1.1 Objetivos

O objetivo do trabalho é elaborar e aperfeiçoar modelos empíricos de previsão e avaliar estratégias para a sua integração com o modelo de grandes bacias (MGB) em localidades do RS.

Em complemento, os objetivos específicos do trabalho são:

- Testar alternativas de concepção dos modelos empíricos;
- Comparar os resultados dos modelos empíricos com o MGB;
- Acoplar os resultados dos modelos de curto prazo com as previsões de médio prazo obtidas com o modelo MGB.

2. REFERECIAL TEÓRICO

Este capítulo tem como objetivo apresentar ao leitor um panorama sobre as principais bibliografias e assuntos estudados nesse trabalho. Ele inicia apresentando como os eventos de cheia foram se tornando um problema nas cidades, com a ocupação urbana ao longo dos anos. Depois são caracterizados, de maneira resumida, os últimos eventos de cheia que ocorreram no estado do Rio Grande do Sul nos anos de 2023, 2024 e 2025. Conectando as inundações com as mudanças climáticas, são abordados alguns fatores que levam o estado do RS a estar mais vulnerável a ocorrência desses eventos, e em seguida são apresentados os métodos que podem ser usados para a resiliência climática, possibilitando conviver com esses eventos, buscando a redução de seus danos. Por fim, são apesentados conceitos fundamentais de previsão hidrológica, objeto de estudo desse trabalho, assim como são apresentados sistemas de previsão no mundo, no Brasil e no estado do RS.

2.1 Cheias e desenvolvimento urbano

O início do desenvolvimento das cidades foi fortemente atrelado às condições ambientais que cada região proporcionava. Nesse sentido, às regiões próximas aos rios proporcionavam um ambiente que facilitava o deslocamento através de barcos e o acesso a água. Os barcos eram o meio de transporte que permitiam o deslocamento de pessoas e o comércio de mercadorias, incentivando o desenvolvimento econômico. O acesso a água permitia que várias atividades cotidianas como beber água, cozinhar, lavar roupas e fazer higiene fossem realizadas com praticidade. Dessa forma, entendem-se os motivos pelos quais grandes cidades e capitais estão localizadas na beira dos rios (Ferri e Togni, 2012; Tucci, 2007).

De maneira geral, o desenvolvimento próximo aos rios fazia com que a infraestrutura das cidades e os seus habitantes ficassem vulneráveis a ocorrência de inundações, que poderiam ocorrer em diferentes escalas (Tucci, 2007). Em cidades de relevo mais plano, as inundações faziam com que os níveis dos rios subissem e que a região da cidade fosse alagada. Já em cidades com relevo mais declivoso, essas inundações poderiam ocorrer em forma de enxurrada e levar consigo casas e partes das cidades, além de criar um cenário mais perigoso para os cidadãos.

O processo de inundação ocorre quando as águas do rio ultrapassam a sua calha principal e se estendem ao longo da sua planície de inundação. A calha principal de um rio é a região na

qual o seu escoamento permanece na maior parte do tempo, para condições climatológicas normais. Já a planície de inundação corresponde a região em que o rio irá avançar em caso de uma inundação. Na natureza, o processo de inundação é natural ao ecossistema, e não causa danos. Já nos rios próximos as cidades, o processo de inundação pode causar uma série de danos, já que em muitos casos a ocupação é feita dentro da calha do rio, fazendo com que a população esteja ainda mais vulnerável, sofrendo prejuízos com pequenas inundações (Tucci, 2007). A Figura 2.1 exemplifica a calha principal do rio e a sua planície de inundação na cidade e na natureza.

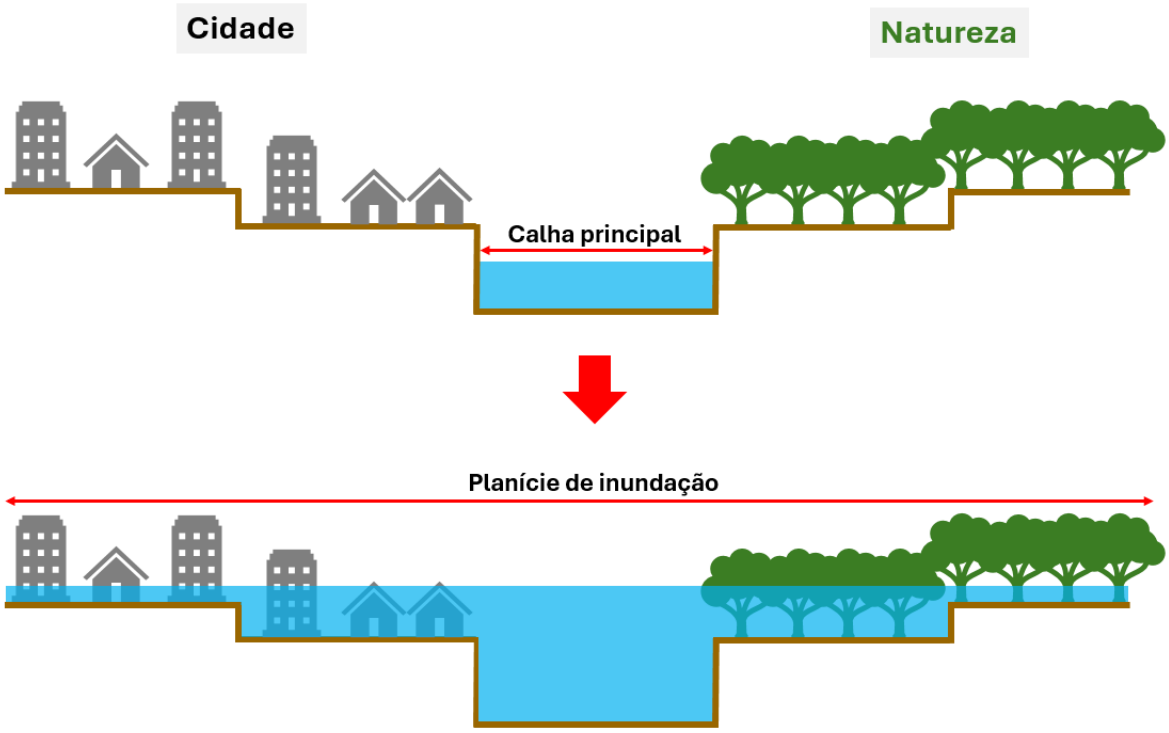

Figura 2.1. Exemplo do processo de inundação nas cidades e na natureza.

Tucci (2004) destaca que a partir da segunda metade do século passado no Brasil os eventos de inundação passaram a ocorrer com maior frequência, devido ao crescimento das cidades e densificação urbana. Junto com o desenvolvimento também ocorria outro problema, a impermeabilização do solo e a canalização do escoamento dos rios, através da implementação de condutos e canais. A impermeabilização do solo através do processo de urbanização faz com que a água que infiltrava no solo passe a escoar, aumentando o escoamento superficial (Tucci et al., 1995).

Várias cidades do estado do Rio Grande do Sul desenvolveram-se próximas a cursos d'água, como é o caso da cidade de Lajeado (Scheibe et al., 2015). A cidade de Porto Alegre é

um exemplo, já que se desenvolveu a beira do rio Guaíba. Antigamente, a cidade apresentava uma grande vantagem pela sua localização, sendo uma cidade portuária que recebia produções vindas do interior, e através da Lagoa dos Patos estava ligada ao Oceano Atlântico. Dessa forma a cidade tornou-se o principal centro comercial do extremo sul do Brasil (Possa et al., 2022). Em contrapartida, a cidade está localizada próximo a confluência de grandes rios, ficando vulnerável na ocorrência de eventos de inundação, como na grande cheia que ocorreu em maio de 1941 (Figura 2.2), nas cheias de menor magnitude nos anos de 1967 e 2015, e, por fim, nas cheias dos anos de 2023 e 2024.



Figura 2.2. Águas do Guaíba dentro da cidade de Porto Alegre na grande cheia de maio de 41.
Fonte: Acervo do Museu Joaquim Felizardo.

2.2 Cheias no RS

O estado do Rio Grande do Sul é composto por três principais regiões hidrográficas, sendo elas: Bacia do Guaíba, Bacias Litorâneas e Bacia do Uruguai. Dentro delas, existem ao todo 25 bacias hidrográficas, sendo 9 pertencentes a RH da Bacia do Guaíba, 11 a RH da Bacia do Uruguai e 5 a RH das Bacias Litorâneas. Observa-se na Figura 2.3 que as regiões de maiores altitudes estão localizadas na RH do Guaíba e em parte da RH do Uruguai, sendo a RH Litorânea composta com regiões de menores altitudes (parte C). Na figura também são apresentados os rios (parte A), cujos nomes são atribuídos as bacias, as grandes bacias presentes

no rio grande do sul hidrológico (abrangendo os limites hidrográficos, e não estaduais) (parte B), e, por fim, um mapa de tipos de rocha presentes no estado (parte D).

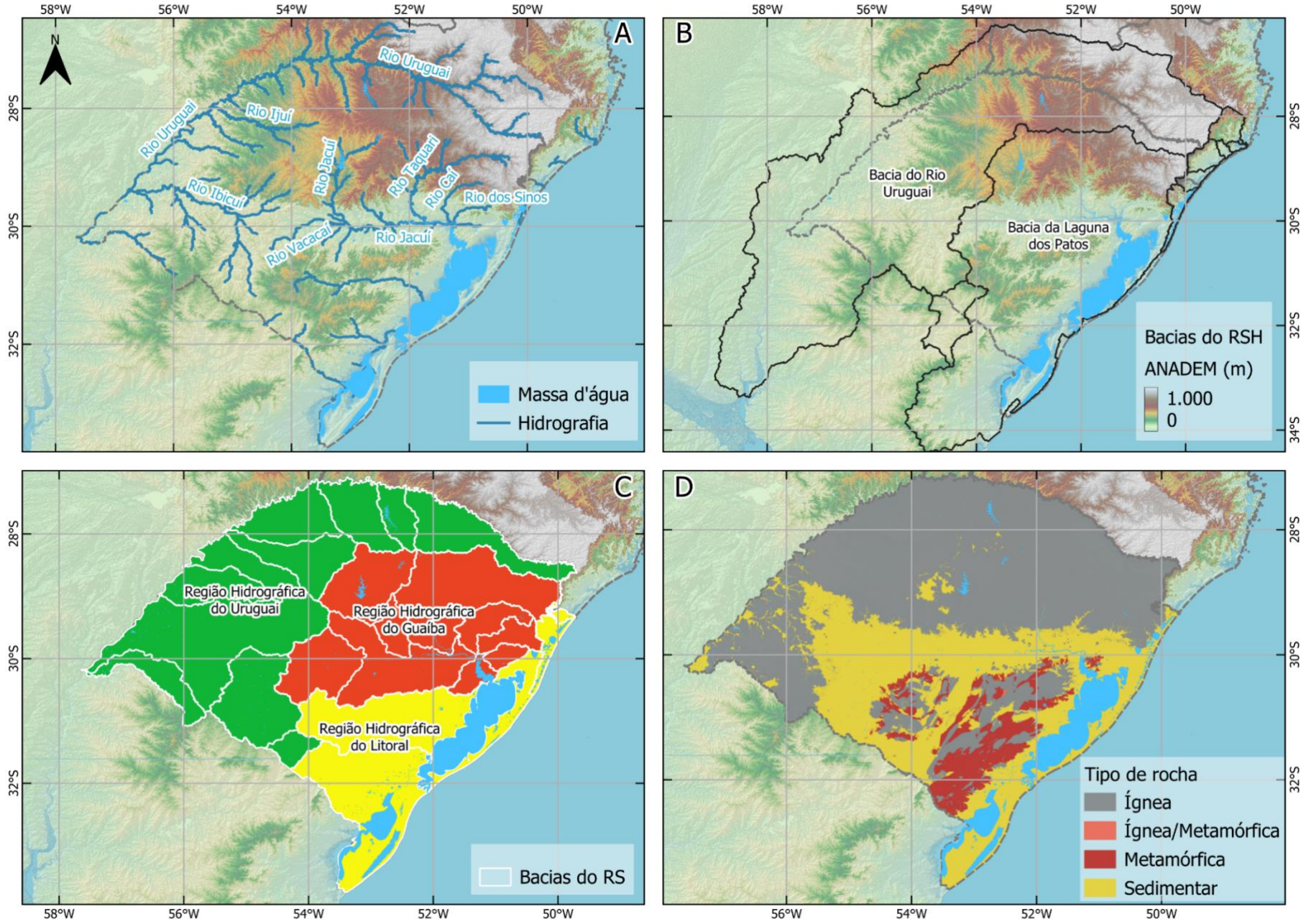

Figura 2.3. Mapa com a representação da hidrografia, bacias do RSH, bacias do estado do RS e tipo de rocha presente no RS.

O comportamento hidrológico dos rios está intrinsicamente associado ao ecossistema do qual ele faz parte. Ao longo das bacias presentes do rio Guaíba existem diferentes características que impactam no escoamento dos rios. Na região norte das bacias dos rios Jacuí e Taquari, formadas por vales inclinados, os solos mais comuns são os Leptossolos, que são relativamente rasos e são formados sobre basalto, com capacidade de armazenamento de água relativamente baixa. O volume escoado tende a ser alto, se comparado com regiões com solos mais arenosos ou profundos, e em função da declividade do terreno e dos rios, este volume tende a escoar em menos tempo (Collischonn et al., 2025). Nessa região foi observada a ocorrência das maiores vazões de pico específicas do Brasil (para áreas de drenagem da ordem de 1000 a 30.000 km²), e a ocorrência dos maiores incrementos de cota em 24 horas do Brasil (Miranda et al., 2024).

Já nos rios Vacacaí, Gravataí, partes dos Sinos e ao longo do baixo Jacuí existem planícies de inundação, onde predominam os Planossolos, fazendo com que a onda de cheia tenha propagação mais lenta, estendendo-se para dentro das zonas de várzea (Collischonn et al., 2025). Essas características podem ser observadas na Figura 2.3 (partes A e B), através do modelo digital de terreno ANADEM (Laipelt et al., 2024), em que regiões de maior altitude tendem a ter vales mais encaixados, com escoamentos mais rápidos, enquanto áreas de menor altitude, com maiores planícies de inundação, tendem a ter um processo de inundação mais lendo.

A maior cheia que já ocorreu no Guaíba desde 1873 foi a cheia extraordinária de 2024, atingindo 5,37 metros na estação Cais Mauá (Germano et al., 2024). Antes dela, a maior cheia que já havia ocorrido foi a do ano de 1941, atingindo a marca de 4,76 metros no dia 08 de maio (Guimarães, 2009). Durante aproximadamente 40 dias no ano de 1941 a cidade de Porto Alegre foi inundada pelas águas do Guaíba, que afetaram cerca de 70 mil habitantes. Considera-se que as chuvas causadoras do evento duraram 24 dias, iniciando em 13 de abril, e estendendo-se até o dia 06 de maio. Não ocorreram medições de vazão durante o evento no Guaíba, mas a vazão de pico foi estimada, com uma incerteza muito grande, em 27.433 m³/s, com base nas medições de vazão realizadas na estação de montante, em São Jerônimo, no rio Jacuí (Silveira, 2020).

Entre os anos de 1941 e 2015 ocorreram outras cheias de menor magnitude no Guaíba, como a cheia de 1967 e 2015, em que foi ultrapassada a cota de inundação de 3 metros do cais do porto (Silveira, 2020). Além do Rio Guaíba, outros rios do Rio Grande do Sul sofrem com cheias recorrentes, como é o caso das bacias dos rios Taquari, Caí, Sinos e Uruguai. A primeira enchente que se tem notícia que ocorreu no vale do rio Taquari foi no ano de 1858, na cidade

de Mariante (Schierholt, 1994 apud Ferri e Togni, 2012). Siqueira et al. (2016) apresenta que a ocorrência de cheias na região da bacia do rio Taquari é anual, e as cheias às vezes ocorrem mais de uma vez ao ano, como em 2007, 2009, 2010 e 2011. O autor também destaca que em situações críticas, a vazão do Rio Taquari pode ser superior a 10.000 m³/s, com aumentos de mais de um metro por hora no nível do rio. Collischonn et al. (2020b), complementa o histórico de ocorrência de cheias citando a inundação que ocorreu no ano de 2020, registrada como a quarta maior desde o início da série histórica até aquele momento. Para um histórico mais completo pode ser acessado o trabalho de Moraes et al. (2023), que apresenta a nota técnica com a revisão e consolidação da série histórica dos níveis das cheias do rio Taquari em Lajeado de 1939 a 2023.

Na bacia do rio Caí os eventos de cheia também são recorrentes, como mostra o trabalho de Schröder et al. (2013), que apresenta imagens e relatos das cheias de 1920, 1928, 1932,1982 na cidade de São Sebastião do Caí. A bacia também foi afetada pela enchente de 1941, registrando o nível de 920 cm na estação Passo do Montenegro (87270000). Mais recentemente podem ser citadas as cheias dos anos de 2007, 2009, 2011, 2013, e 2016, sendo a cheia de 2007 com o maior nível dentro do período de 1997 até 2021 na estação Barca do Caí (87170000) (Silva et al., 2022, Marcuzzo et al., 2023).

A bacia do rio dos Sinos também é afetada historicamente por eventos de inundação, com destaque para os anos de 1898 e 1926. A bacia também foi afetada pela enchente de 1941 (alcançando 6,08 metros), e em seguida nos anos de 1957, 1963, 1965, 1967 e 1969, superando os 5 metros na cidade de São Leopoldo (Vieira,1970). Devido à ocorrência desses eventos de inundação, em 1974 foram iniciadas as obras de construção de um sistema de proteção contra cheias na região, através de diques para proteção da cidade de São Leopoldo. Após isso, foram observados grandes eventos de inundação nos anos de 1984 e 2013.

Na bacia do rio Uruguai também ocorrem eventos de inundação recorrentes. Analisando o período de 1980 a 2005 ocorreram cheias nos anos de 1983, 1984, 1989, 1990, 1993, 1997 e 1998 (Righi et al., 2010). Mattiuzi et al. (2023) identificaram que na estação Uruguaiana (77150000), dos 83 anos da série de dados (1940-2022), em 53 anos ocorreram pelo menos um registro de cota acima da cota de inundação, representando 64% dos anos da série histórica.



Figura 2.4. Imagens de cheias históricas nas bacias dos rios dos Sinos (cidade de São Leopoldo), Caí (cidade de São Sebastião do Caí), Uruguai (cidade de Iraí) e Taquari (cidade de Lajeado).

Fonte: São Leopoldo: https://www.facebook.com/photo?fbid=1180753598739597&set=pcb.1180738668741090, Caí: Schröder et al. (2013), Uruguai: https://metsul.com/historico-medio-e-alto-uruguai-enfrentam-maior-enchente-das-ultimas-decadas-na-regiao/, Taquari: Ferri e Togni (2012).

Nos anos de 2023 e 2024 ocorreram cheias históricas em várias bacias hidrográficas do estado do Rio Grande do Sul. No ano de 2023 a bacia do rio Taquari passou por duas grandes cheias, uma em setembro e outra em novembro. A cheia de setembro foi catastrófica, superando os níveis já medidos na região e tornando-se a maior cheia da história da bacia hidrográfica (Alvalá et al., 2024), ultrapassando 51 cm ou 66 cm (dependendo a fonte dos dados observados) a cheia de maio de 1941 (Moraes et al., 2024). Em novembro a cheia se igualou a de 1941, tornando-se a segunda maior enchente na cidade de Lajeado entre os anos de 1939 e 2023 (Moraes et al., 2024).

No mês de novembro de 2023 a bacia hidrográfica do rio Caí também passou por uma cheia histórica, alcançando 16,08 metros em 18 de novembro no município de São Sebastião do Caí e ficando atrás apenas da cheia de 1941 (SGB, 2024). Esses eventos causaram muita destruição por onde passaram, principalmente na bacia do rio Taquari, onde o aumento dos níveis dos rios foi muito rápido, levando a perda de vidas. O efeito dos eventos de cheia foi sentido no rio Guaíba, ultrapassando as cotas de inundação do Cais Mauá (Collischonn et al., 2025).

No período de 01/09/2023 a 12/09/2023, contabilizando 12 dias, observou-se na bacia do rio Taquari acumulados de chuva que variaram, aproximadamente, de 250 mm a 450 mm. Já na bacia do rio Caí os acumulados chegaram a 300 mm (Paiva et al., 2025b). Nos meses de abril e maio de 2024 as cheias anteriores foram ultrapassadas e eventos mais fortes foram registrados na bacia que drena para a Laguna dos Patos, impactando também na bacia do rio Uruguai. As maiores precipitações ocorreram na região que drena para o rio Guaíba, onde destacam-se as bacias dos rios Pardo e Pardinho, Caí, Taquari, Sinos e Jacuí como fortemente afetadas. Os grandes acumulados de chuvas geraram cheias simultâneas nesses rios, fazendo com que o rio Guaíba registrasse níveis históricos, superando a grande cheia de 1941(Collischonn et al., 2025).

O desastre afetou diretamente centenas de milhares de pessoas, causando a inundação de mais de 15. 000 Km², fazendo 182 vítimas fatais e deixando 29 desaparecidas, três meses após a ocorrência do evento. A chuva que ocorreu no evento é descrita como provavelmente a chuva mais intensa que já foi observada no Brasil para áreas afetadas de 2.000 a 100.000 Km², dentro do período de 3 a 14 dias (Collischonn et al., 2024). O trabalho também destaca que a localização espacial da concentração da chuva, que ocorreu dentro dos limites da região hidrográfica do Guaíba, contribuiu para a ocorrência dos eventos de cheia catastróficos.

Entre os dias 25/04/25 e 15/05/25 foram registrados grandes acumulados de chuva nas bacias que compõem a região hidrográfica do Guaíba. Na bacia do rio Taquari os acumulados de chuva superaram os 1.000 mm em muitos pontos da bacia. Já na bacia do rio Pardo os maiores acumulados se concentraram na região norte, chegando aos 1.000 mm. Na parte sul da bacia do Alto Jacuí e na região noroeste do Baixo Jacuí os acumulados chegaram aos 900 mm. Na bacia do rio Caí, fortemente atingida pelas inundações os acumulados variaram na faixa dos 800 aos 700 mm. Na bacia do rio dos Sinos os maiores acumulados variaram de 800 a 700 mm, na região de cabeceira, e atingindo os 600 mm ao longo da bacia. Nas bacias do Guaíba, Gravataí e Vacacaí-Mirim os acumulados variaram de 600 a 400 mm (Paiva et al., 2025b). A Figura 2.5 mostra espacialmente os acumulados de chuva na bacia do Guaíba e a Figura 2.6 mostra algumas cidades atingidas pelo evento.

As cheias decorrentes do evento de 2024 resultaram em vazões próximas ou superiores às vazões de projeto em empreendimento hidrelétricos nos rios Jacuí e Antas (UHE Dona Francisca, PCH Salto do Forqueta, usinas do CERAN, incluindo a UHE Castro Alves). As vazões dos rios Guaíba, Taquari-Antas e Jacuí representaram, respectivamente, aproximadamente, 89%, 93% e 62% dos máximos globais, pela curva envoltória de Creager (Paiva et al., 2024b).

Em 2025, o estado do Rio Grande do Sul voltou a ser impactado por novos eventos de cheia, desta vez com maior magnitude na região central, afetando em especial as bacias dos rios Uruguai e Jacuí. Nos meses de junho e julho municípios como Santa Maria, Jaguari, Cachoeira do Sul e Agudo registraram impactos significativos, com famílias desalojadas e prejuízos materiais (G1, 2025). Também foram registrados aumentos dos níveis dos rios nas bacias dos rios Taquari, Sinos e Caí, contribuindo para a elevação dos níveis nos rios Jacuí e Guaíba, que ultrapassaram suas respectivas cotas de inundação. No rio Jacuí o evento de cheia foi comparável com as enchentes de 2024 e 1941 (Correio do Povo, 2025). A Figura 2.7 mostra a comparação dos acumulados de chuva, usando informações de estações pluviométricas, nos diferentes eventos de cheia na bacia do Guaíba.

Diante disso, observa-se que pode haver uma tendência de aumento dos eventos de cheia no estado. Nesse sentido, torna-se necessário entender a influência da variabilidade do clima, já que ela impacta diretamente o ciclo hidrológico, e, por consequência, os eventos de cheia.

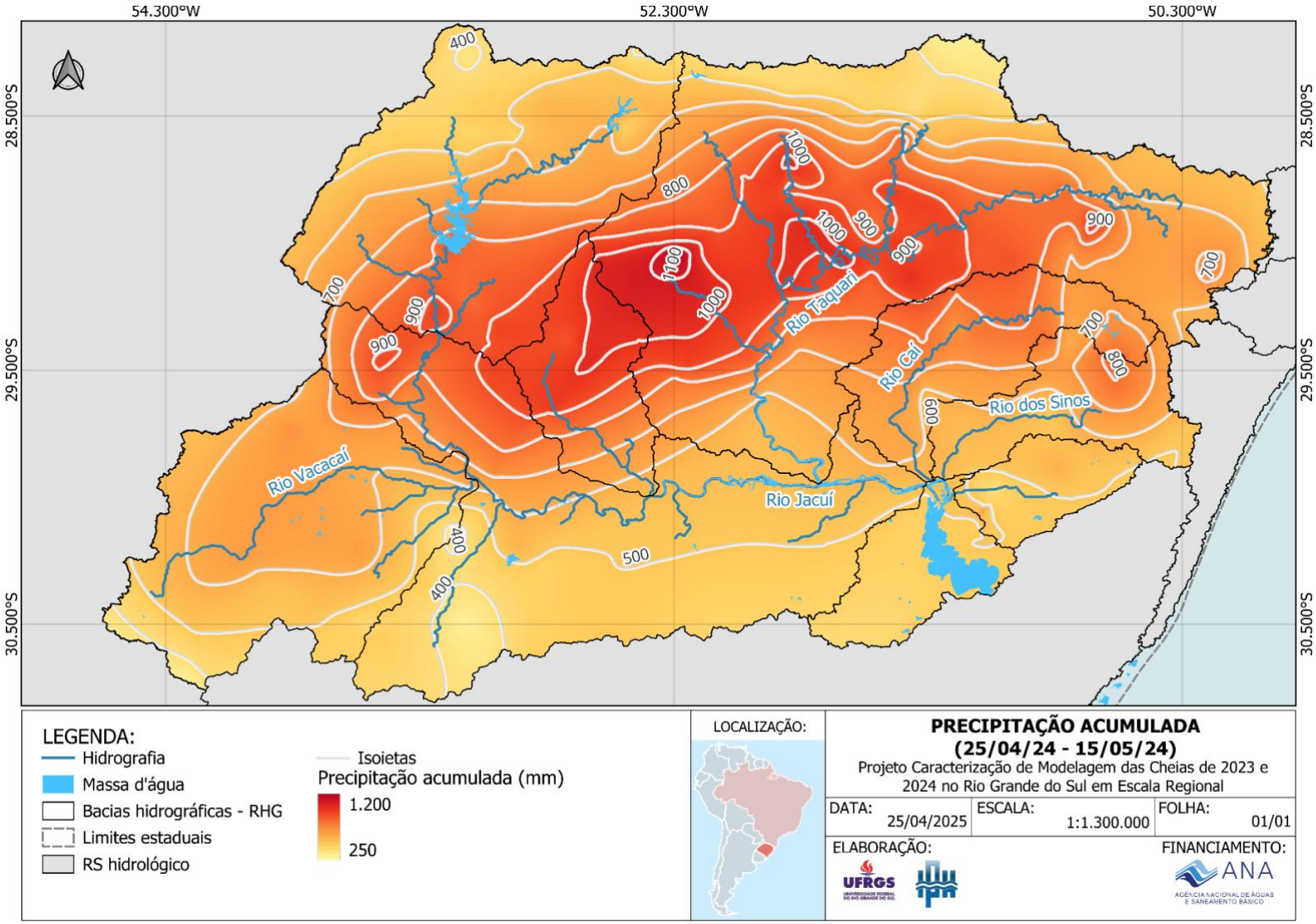

Figura 2.5. Chuva acumulada na bacia do Guaíba entre os dias 25/04/2025 e 15/05/2025.
Fonte: Paiva et al., 2025b.



Figura 2.6. Cheia dos meses de abril e maio de 2024 nas bacias dos rios Caí (cidade de São Sebastião do Caí), Guaíba (cidade de Porto Alegre), Taquari (cidade de Lajeado) e Sinos (cidade de São Leopoldo).

Fonte: São Sebastião do Caí: https://www.saosebastiaodocai.rs.gov.br/site/2024/05/03/sao-sebastiao-do-cai-enfrenta-a-maior-enchente-de-seus-149-anos-de-historia/, Porto Alegre: https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/06/11/mercado-publico-reabre-parcialmente-nesta-sexta-feira-um-mes-apos-inundar-durante-enchente-em-porto-alegre.ghtml, Lajeado: https://www.lajeado.rs.gov.br/noticia/13628/892?titulo=Prefeitura+de+Lajeado+realiza+ato+simb%C3%B3lico+em+lembran%C3%A7a+da+enchente+hist%C3%B3rica+de+maio+de+2024 e São Leopoldo: https://sul21.com.br/noticias/geral/2024/06/moradores-de-sao-leopoldo-relatam-dificuldades-para-acessar-beneficios-apos-enchente/.

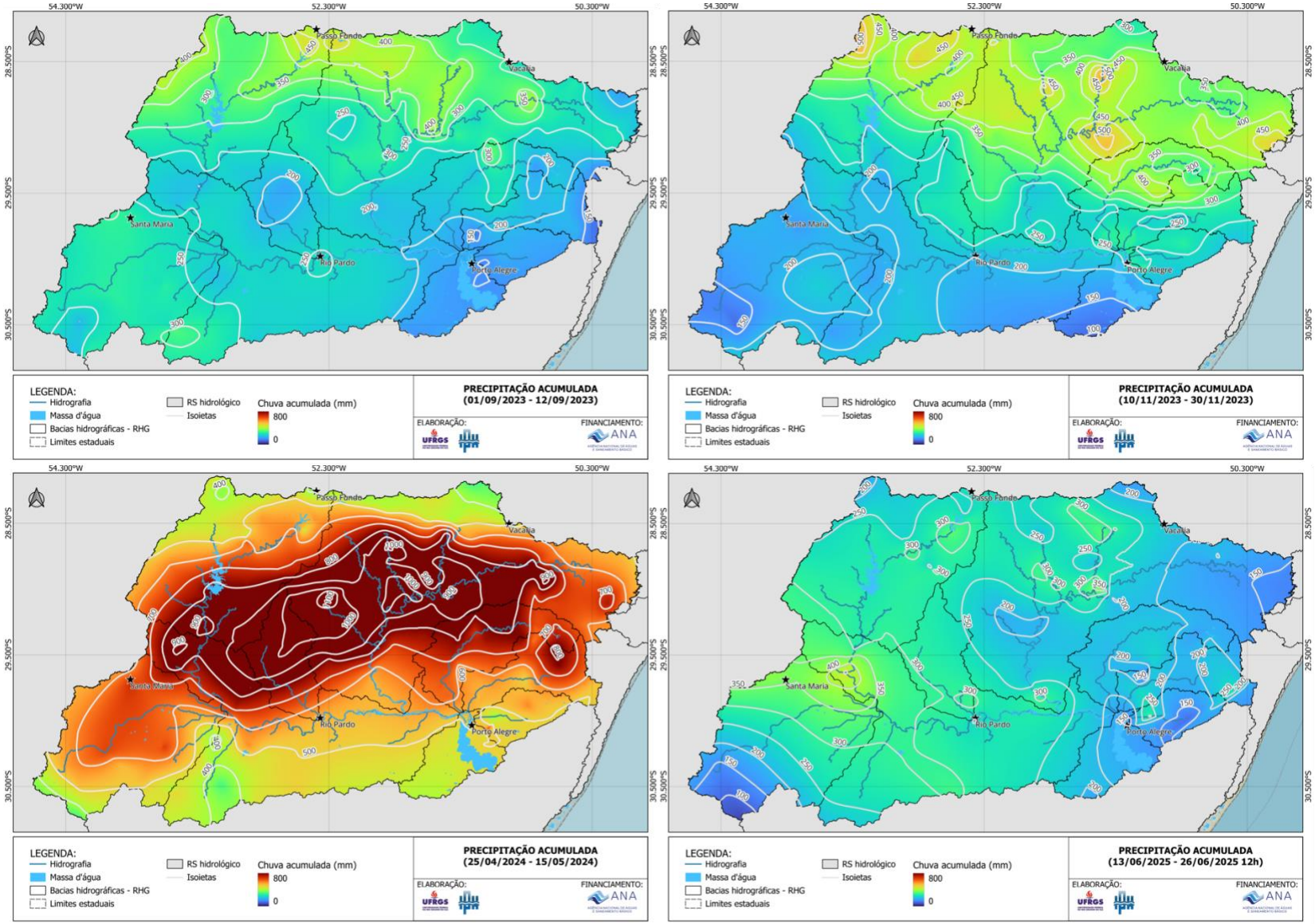

Figura 2.7. Comparação das chuvas ocorridas no estado em setembro de 2023, novembro de 2023, abril-maio de 2024 e junho de 2025 na bacia hidrográfica do Guaíba.

2.3 Mudanças climáticas e alterações nas cheias no futuro do RS

Conhecer tendências futuras e quantificar alterações no ciclo hidrológico é uma prática essencial na hidrologia. O Painel Intragovernamental sobre Mudanças no Clima (IPCC) (Arias, 2021), apresenta o impacto da emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, alterando o regime de chuvas e impactando na frequência e na magnitude de eventos hidrológicos extremos. Usando modelos globais de clima (GCMs), o IPCC informa no seu relatório conhecido como CMIP6, para diferentes cenários de efeito estufa, informações sobre os elementos do ciclo hidrológico para o futuro (Paiva et. al., 2024).

Considerando essas mudanças, são elaboradas bases de dados contendo informações sobre elementos do ciclo hidrológico afetados por mudanças climáticas, como a precipitação e a vazão. Petry et al. (2025) analisaram as mudanças na magnitude e na frequência de cheias na América do Sul com a base de dados do *Coupled Models Intercomparison Project* CMIP6, que conta com 28 modelos climáticos globais - *Global Climate Models (GCMs)*, considerando um cenário intermediário de emissão de CO2 (SSP2-4.5). Na análise foram comparados resultados gerados no período histórico (1950 – 2014) e no período futuro (2015 – 2100).

Como resultado, o trabalho identificou que na região sul do Brasil existem sinais de aumento de magnitude das vazões máximas em 20%, aproximadamente. Especificamente no estado do Rio Grande do Sul existe um sinal de intensificação dos eventos de cheia em rios como o Taquari e o Caí, onde a vazão máxima no período histórico com TR de 5 anos pode dobrar e para o TR 100 anos pode ter um aumento 5 vezes na frequência de ocorrência no período futuro. A Figura 2.8 mostra para os tempos de retorno de 100 e 5 anos as variações na frequência de eventos de cheia:

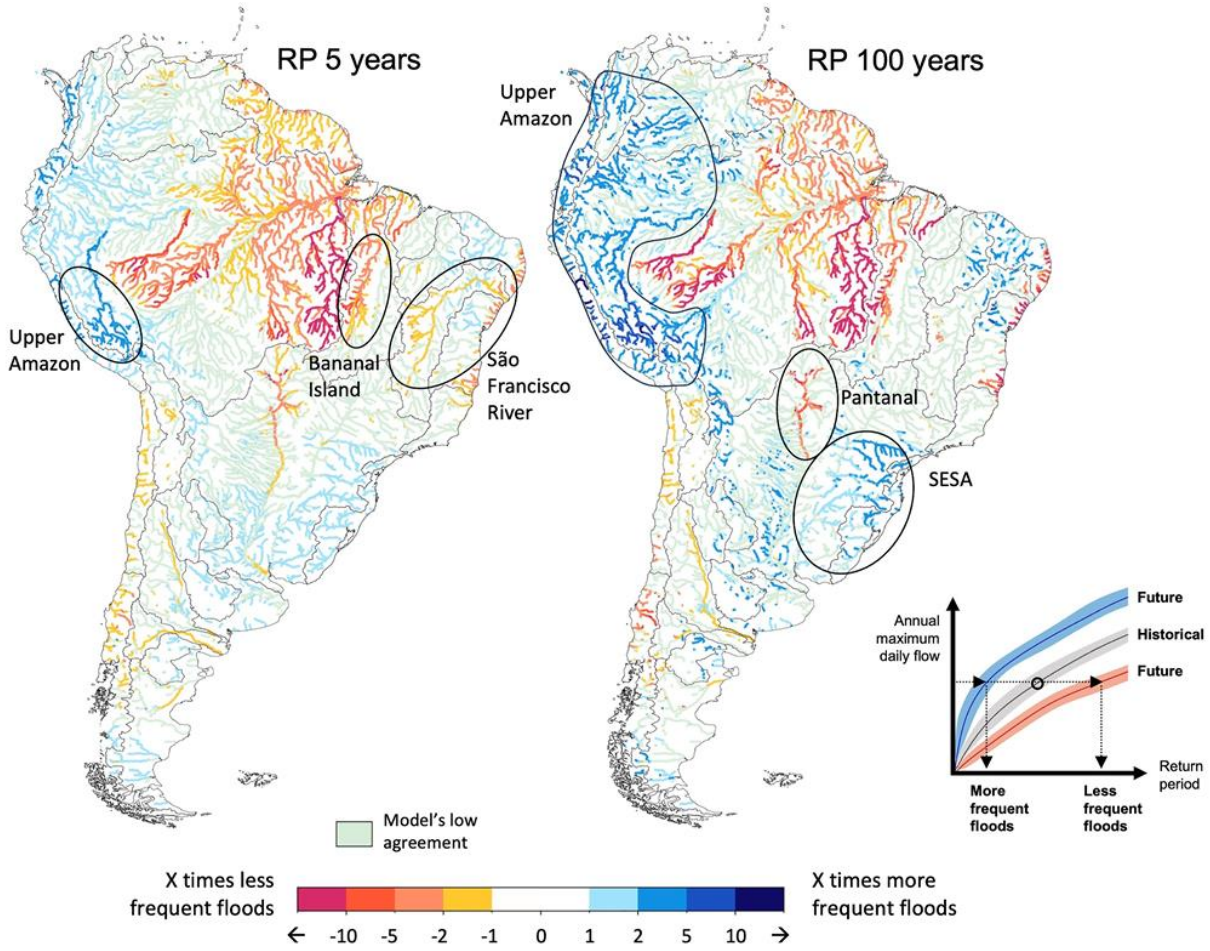

Figura 2.8. Variação da frequência de eventos de cheia na América do Sul para os TRs de 100 e 5 anos.

Fonte: Petry et al. (2025).

Os resultados apresentados por Petry et al. (2025) de aumento de magnitude e frequências de eventos de cheia já foram vistos nos últimos anos (2023, 2024 e 2025) no estado do Rio Grande do Sul, que passou por cheias históricas na região hidrográfica do Guaíba (Collischonn et al., 2025). Pensando nisso, um grupo composto por pesquisadores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) elaborou critérios hidrológicos para adaptação as mudanças climáticas, com ênfase nos eventos de chuvas e cheias extremas na região Sul do Brasil. O documento apresentou, entre outras coisas, diretrizes de adaptação às mudanças climáticas para aplicações em projetos de infraestrutura (Paiva et al., 2024a).

Em complemento, o trabalho de Schuster et al. (2020) avaliou a variação da disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas presentes na Laguna dos Patos oriundas das mudanças climáticas previstas pelos modelos globais do quinto relatório do IPCC. Os resultados mostraram uma tendência de aumento das vazões para a área de estudo, com destaque para os cursos d'água localizados mais ao sul, como a bacia do Rio Camaquã e o Canal São Gonçalo, especialmente para o futuro distante (2015 a 2080).

Paiva et. al (2025a) analisaram o histórico da ocorrência de inundações no Guaíba, identificando que a década mais recente, entre os anos de 2015 e 2024, as cheias extremas podem estar se tornando maiores e mais frequentes do que o esperado (Figura 2.9). Entre os anos de 1899 e 2014 a cota de inundação do Guaíba, de três metros, foi superada somente quatro vezes em um período de 115 anos, com destaque para o evento de 1941. Já na década mais recente, a cota de inundação já foi superada quatro vezes, nos anos de 2023, 2024 e 2025. Em 2023 ela foi superada nos eventos de cheia que ocorreram na região nos meses de setembro e novembro, e no ano de 2024 o rio Guaíba alcançou 5,37 metros no desastre ocorrido nos meses de abril e maio.

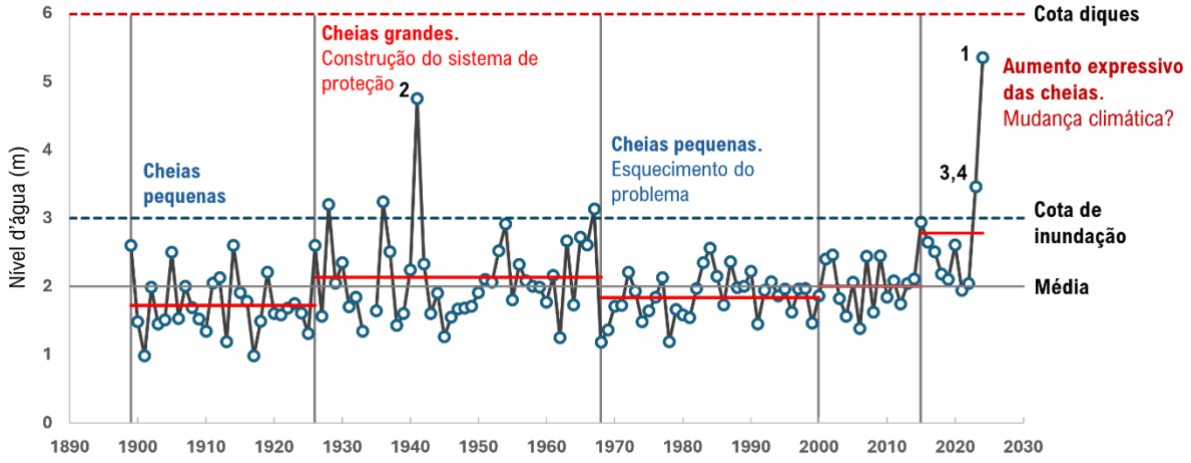

Figura 2.9. Análise das cotas do Guaíba ao longo dos anos (1900 a 2024). Fonte: Paiva et al., 2025a.

Usando um incremento de 20% nas vazões observadas no evento de 2024 no rio Guaíba, considerando os impactos das mudanças climáticas em cheias futuras, ocorreria um acréscimo de 0,7 metros nos níveis do Guaíba (Miranda et al., 2024). Observa-se também na década recente (de aumento expressivo das cheias), a ocorrência do fenômeno climático El Niño (WMO, 2024), caracterizado pelo aumento nas taxas de precipitação e maior probabilidade de ocorrência de evento de cheia no Sul do Brasil (Petry, 2024). Em complemento, a região Sul do Brasil apresenta muitos eventos críticos de cheia, sendo que 43% de trechos de rios da região são classificados em alta vulnerabilidade à inundação. A classificação é feita com base na avaliação da recorrência e grau de impacto das inundações (ANA, 2014).

2.4 Métodos para resiliência climática

Nesse contexto, existem formas de aumentar a resiliência climática das cidades, diminuindo as consequências de grandes eventos de cheia. Por exemplo, conhecer o tempo necessário para que uma onda de cheia atravesse uma bacia hidrográfica pode ser crucial em um evento de inundação severa, principalmente em bacias de resposta rápida a chuva, garantindo que as pessoas saiam de suas casas antes de estarem potencialmente sujeitas ao perigo.

A ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como as inundações presenciadas nos últimos anos no estado do Rio Grande do Sul, salienta a necessidade da preparação e adaptação das cidades. Como foi apresentado anteriormente, as projeções das mudanças climáticas mostram que existe uma tendência crescente na frequência e na intensidade das cheias no Sul do Brasil (Paiva et al., 2025a). Diante disso, as medidas estruturais e as medidas não estruturais são uma forma de enfretamento a esses eventos, adicionando resiliência as cidades para o enfrentamento de eventos de cheia. As medidas estruturais correspondem a obras hidráulicas, como diques, dragagem e desvio dos rios, casas de bomba, muros, e outros sistemas de proteção que através de barreiras físicas bloqueiam o avanço das inundações, modificando o ambiente em que são inseridas (Kobiyama et al., 2004).

As medidas estruturais ainda podem ser divididas em intensivas e extensivas, de acordo com a área em que são implementadas. As medidas intensivas são representadas pela construção de obras como barragens usadas para conter ondas de cheia, diques, muros, ampliação de canais e a dragagem de rios naturais. Já as medidas extensivas representam intervenções que são distribuídas ao longo da bacia hidrográfica, como controle da erosão do solo, recuperação da mata ciliar e a recomposição de brejos e banhados (Paiva et al., 2025a).

Um exemplo de medida estrutural intensiva é o sistema de proteção contra cheias na região metropolitana de Porto Alegre (RMPA), que foi construído nas décadas de 70 e 80, composto por diques, muros e casas de bomba. Ele possui aproximadamente 120 Km de muros e diques, além de 38 casas de bombas. Na cidade de Porto Alegre, o muro de proteção conta com 14 comportas, que são fechadas quando o nível do Guaíba ultrapassa a cota de inundação de 3 metros (Collischonn et al., 2025).

Durante o evento de maio de 24 as medidas de proteção falharam de forma generalizada, por diversos motivos. Nos diques houve casos em que a água ultrapassou a cota da crista, situações de rebaixamento do dique que levou ao galgamento da água e formação de brechas e

transbordamento por falhas na construção (Collischonn et al., 2025). Ocorreram casos também de colapso de comportas de proteção e falhas nas estações de bombeamento. A Figura 2.10 mostra as falhas em medidas estruturais na região de Porto Alegre durante o evento dos meses de abril e maio de 2024.

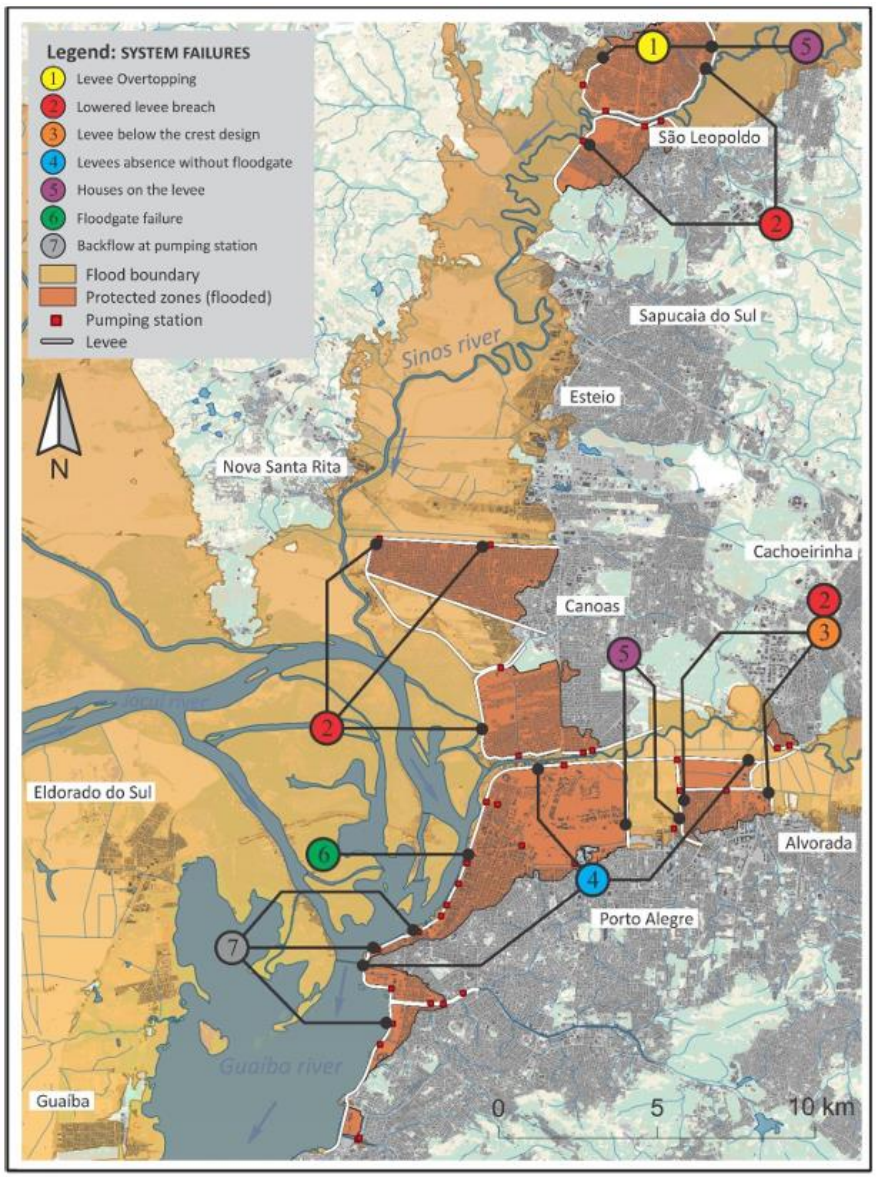

Figura 2.10. Falhas em medidas estruturais na região de Porto Alegre e região durante o evento de maio de 24.
Fonte: Collischonn et al. (2025).

A construção de obras hidráulicas para medidas estruturais demanda o desenvolvimento de projetos de engenharia cuidadosamente elaborados, já que nas maiores cheias o volume de água é muito alto e distribuído ao longo da bacia hidrológica, fazendo com que soluções pontuais não resolvam o problema por completo. Além disso, essas obras exigem manutenção periódica, e durante grandes eventos de cheia, as suas características de operação podem ser

excedidas, levando a rompimentos e ampliando os impactos negativos sobre a população (Paiva et al., 2025a). Tucci (2007) apresenta que as medidas estruturais podem criar uma sensação de falsa de segurança, fazendo com que ocorra a ampliação da ocupação de regiões de risco, inundáveis, levando a danos futuros significativos.

Em complemento, as medidas não estruturais fazem parte de ações que propiciam o conhecimento sobre o comportamento inundações, como a realização do zonamento nas cidades, onde são identificadas as regiões de perigo nas cidades (Kobiyama et al., 2004). Além disso, podem ser identificadas as regiões mais altas e seguras contra enchentes, realizar a conscientização sobre a convivência com as cheias, fortalecer o monitoramento hidrológico, entre outras. Um exemplo são os mapeamentos de suscetibilidade e de risco, realizados pelo SGB, que buscam identificar regiões potencialmente suscetíveis a ocorrência de movimentos de massa e inundações. No mapeamento de suscetibilidade é avaliado o município inteiro e no mapeamento de risco a análise é direcionada para as regiões onde existe população.

A Figura 2.11 mostra um exemplo do uso de medidas estruturais e não estruturais para cheias de diferentes magnitudes.

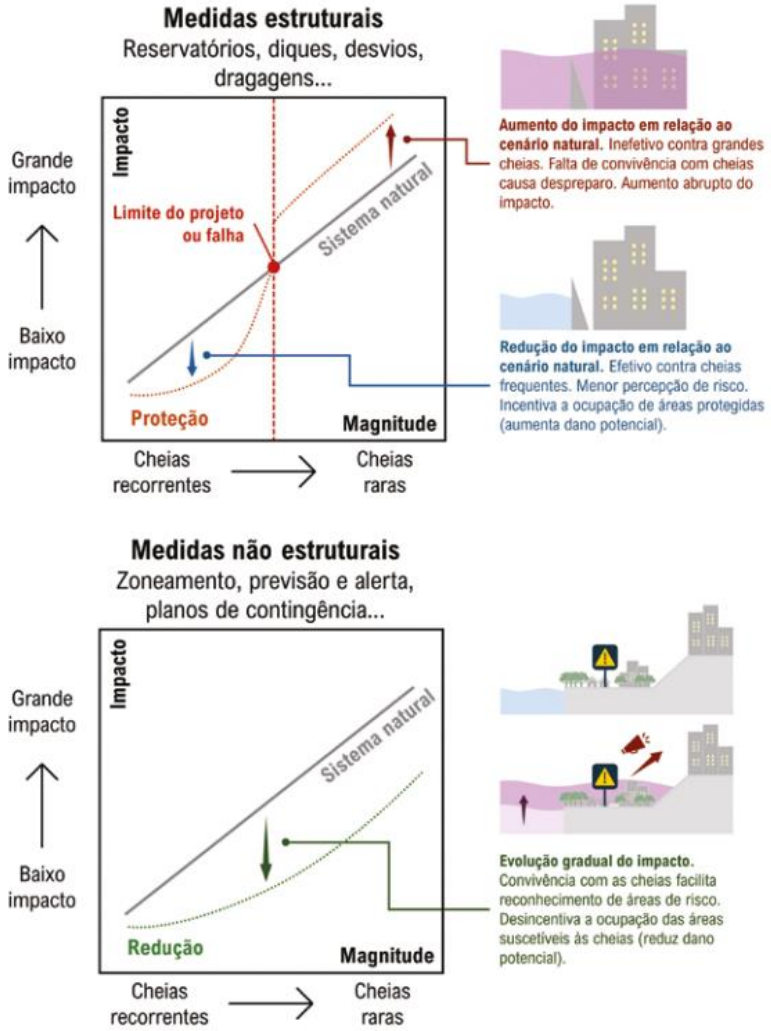

Figura 2.11. Comportamento de medidas estruturais e não estruturais na ocorrência de pequenas e grandes cheias.
Fonte: Paiva et al., 2025a.

Diante desse cenário, o desenvolvimento de sistemas de previsão contribui mutuamente para o bom funcionamento de ambas as medidas, estruturais e não estruturais, tornando-se essencial para mitigar os impactos de grandes eventos. Collischonn et al. (2025) ressalta que sistemas de previsão e alerta devem existir independente de medidas estruturais ou não estruturais e que a existência de medidas estruturais não elimina a possibilidade de ocorrerem inundações, já que essas obras hidráulicas podem falhar durante a ocorrência de cheias. Além disso, em locais onde não existem medidas estruturais em operação, como nas bacias dos rios Taquari, Pardo e Caí, as previsões de níveis podem ser usadas para evacuação das populações de áreas de risco. Os sistemas de previsão são capazes de determinar quando irá ocorrer um evento de inundação, qual será o nível e a vazão gerados pelo evento, de forma contínua, quanto tempo irá durar o evento, entre outras.

Silva e Buffon (2020) analisaram o sistema de alertas hidrológico existente na bacia do rio Caí e identificaram que ao longo dos anos de 2009 a 2020 o sistema conseguiu atuar de maneira positiva, reduzindo prejuízos e prevenindo danos, recomendando a ampliação e a ampliação do sistema de alerta. Nonnemacher e Fan (2023) demonstram que a implantação de um sistema de previsão de cheias no Rio Grande do Sul é economicamente viável, com retorno estimado entre R$ 26,52 e R$ 40,99 por real investido quando considerados apenas os custos de modelagem, e entre R$ 18,13 e R$ 28,02 quando incluídos os investimentos em monitoramento.

Os resultados foram obtidos a partir da média anual de prejuízos por inundações no estado e de pressupostos conservadores quanto à taxa de acerto do sistema e ao percentual de danos evitáveis. Mesmo nesse cenário conservador, o estudo conclui que investir em previsão é economicamente mais vantajoso do que arcar exclusivamente com os custos de remediação pós-desastre, sendo que os valores ainda não consideram correção inflacionária.

Dessa forma, pode-se confirmar que é economicamente vantajoso investir em prevenção do que em remediação. Nesse sentido, torna-se essencial entender como podem ser geradas as previsões dentro de um sistema de previsão, suas características, dados de entrada, resultados alcançados, entre outros. No capítulo a seguir são apresentados esses conceitos.

2.5 Previsão hidrológica

A previsão hidrológica tem como objetivo estimar elementos do ciclo hidrológico como vazões e níveis com uma antecedência de tempo (Tucci, 2005). O período correspondente entre a data de emissão da previsão e a data a qual a previsão termina é chamado de horizonte ou antecedência. As previsões podem ser classificadas de acordo com o seu horizonte em: curto prazo (poucas horas até alguns dias), médio prazo (até 10 dias), subsazonal (até 45 dias) e sazonal (até 9 meses) (Vitart et. al, 2018; NASEM, 2016; Siqueira, 2015; Tucci, 2005). De acordo com o seu horizonte, as previsões podem ter objetivos diferentes. Previsões de curto a médio prazo podem ser eficazes na antecipação dos impactos oriundos de eventos de cheia. Já as previsões subsazonal e sazonal podem ser úteis para a antecipação da ocorrência de eventos de secas e estiagens.

Para a operação de reservatórios de empreendimentos hidrelétricos, as previsões de curto prazo indicam o comportamento futuro afluente ao reservatório (Bravo, 2010), as previsões de médio prazo podem antecipar a tomada de decisão de operação (como abertura ou

não de comportas), enquanto as previsões com os maiores horizontes permitem o planejamento a longo prazo e sustentabilidade hídrica dos reservatórios.

A geração de previsões pode ser feita utilizando diferentes tipos de modelos, como os empíricos, os conceituais e os de base física. Os modelos empíricos são aqueles que usam somente a relação entre as variáveis para gerar previsões, não incluindo conceitos relacionados aos processos físicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica (Tucci, 2005). Já os modelos conceituais usam equações matemáticas para representar os processos hidrológicos, podendo conter parâmetros que não representam de forma fidedigna a realidade do local (Meller, 2012). Já os modelos de base física buscam representar, de forma interligada, todos os processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica (Siqueira, 2015).

As previsões de curto prazo podem representar eventos que ocorrem em um tempo inferior ao tempo de concentração da bacia hidrográfica (Tucci, 2005). Uma das formas de representar o comportamento das vazões e dos níveis é usando como dados de entrada as medições telemetrizadas em equações de regressão linear simples ou múltipla, chamados de modelos empíricos. Para representar eventos com antecedências maiores do que o tempo de concentração de bacias hidrográficas podem ser usados modelos de base física, como os modelos do tipo chuva-vazão, usando previsões de chuva.

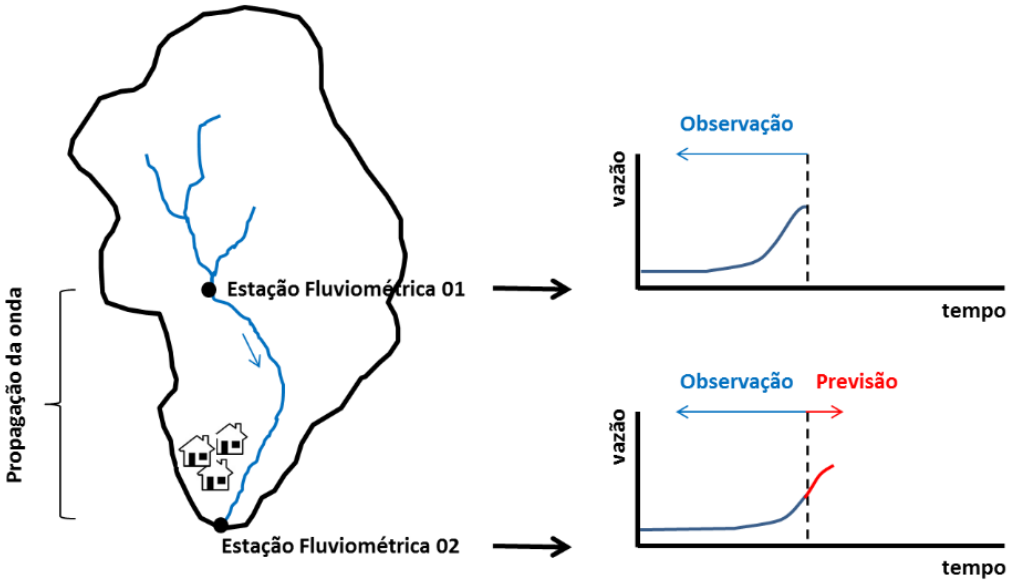

Figura 2.12. Exemplo de modelo hidrológico que usa o deslocamento da onda de cheia.
Fonte: Fan (2015).

Esse tipo de previsão busca estimar o comportamento do deslocamento da onda de cheia na bacia hidrográfica. Para isso, são usadas informações disponíveis em estações de monitoramento (Tucci, 1998). Com isso, é possível definir quais estações ficam a montante e a jusante dos pontos de interesse para os quais são feitas as previsões. A partir da obtenção desses

dados das estações de montante ao ponto de interesse, preferencialmente telemetrizados, são ajustados modelos empíricos que conseguem representar o deslocamento da onda de cheia. Esses modelos podem ser de equações de regressão linear, redes neurais artificiais ou modelos baseados nas equações de Saint-Venant.

A vantagem desse tipo de sistema é que, em geral, eles apresentam uma boa precisão em seus resultados, sem a incorporação das incertezas atreladas a outros tipos de modelos hidrológicos. Por outro lado, a antecedência que eles fornecem depende do tempo de deslocamento da onda de cheia, que pode variar de dias até mesmo horas. Além disso, pode ocorrer a falta de dados telemetrizados na ocorrência de grandes eventos, onde as estações são levadas pelas enxurradas e param de medir.

Usando modelos do tipo chuva-vazão as previsões são geradas a partir da simulação dos processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica. Um dos dados de entrada mais importante nesses modelos são os dados de precipitação. Eles podem ser oriundos de medições observadas em campo (telemetrizados), obtidos a partir de estimativas por satélite e produtos de previsão de chuva (conhecidos como "*Quantitative precipitation forecast"* (QPF)).

Quando o modelo usa dados de precipitação do tipo QPF, os dados de chuva observados são usados até o último intervalo de tempo antes do uso das previsões de chuva (Siqueira, 2015). As previsões de chuva são oriundas de diferentes tipos de modelos meteorológicos, que estão sujeitos a incertezas. Quando é usada apenas uma previsão de chuva, gerando apenas um resultado de vazão, classificada como determinística (Meller, 2012), as incertezas associadas ao resultado aumentam. Buscando minimizar essas incertezas, podem ser usados mais de um modelo meteorológico, ou diferentes condições atmosféricas de inicialização das previsões de chuva. A Figura 2.13 mostra dois exemplos de previsão, um do tipo determinística e outro do tipo por *ensemble*.

Como resultados, são apresentadas várias trajetórias possíveis para o futuro, formando um conjunto de previsões de chuva, que quando inseridas em modelos hidrológicos, permitem que sejam simulados diferentes cenários de previsão de vazão, por exemplo. Essas previsões são chamas de probabilísticas, por conjunto ou por *ensemble* (Meller, 2012). O uso de previsões nesse formato pode ser vantajoso já que explora mais de uma realidade possível, formando o que pode ser chamado de nuvem de resultados, que apresenta diferentes cenários, chamados de membros. Esses cenários auxiliam tomadores de decisão a entender as possíveis trajetórias futuras e a se preparar em caso de possibilidade de ocorrência de um evento de inundação, por exemplo.

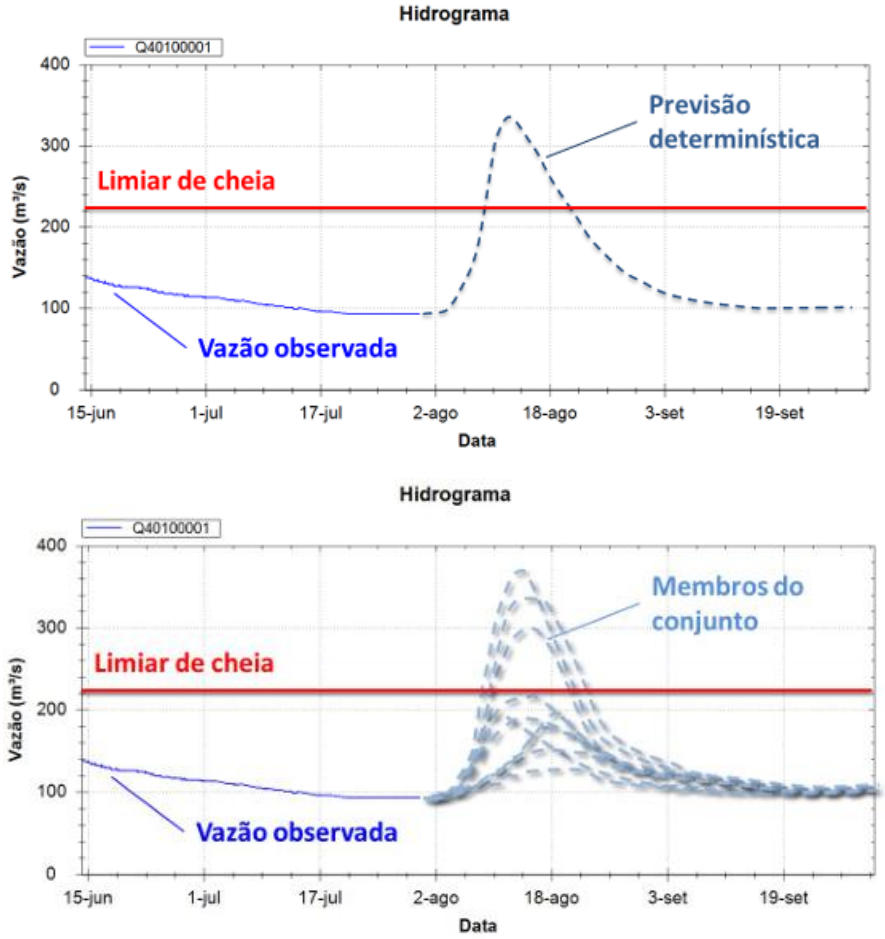

Figura 2.13. Exemplo de previsões do tipo determinística e do tipo ensemble.
Fonte: Fan (2015).

2.5.1 Sistemas de previsão no mundo

No mundo todo são utilizados diversos sistemas de previsão com características diferentes entre si, de acordo com as singularidades de cada região. Isso resulta em sistemas que utilizam diferentes tipos de modelos hidrológicos, que geram previsões para variadas antecedências. Pappenberger et al. (2013) compilaram os sistemas de previsão de vazão operacionais por ensemble existentes no mundo. Dentre os sistemas operacionais atuais destaca-se o GloFAS (*Global Flood Awareness System*) (Alfieri et al., 2013), que através de uma plataforma online disponibiliza uma série de informações, como previsões de vazão, para o mundo todo, usando o modelo Lisflood. Os resultados estão disponíveis para a rede de drenagem e para as bacias dos grandes cursos d'água. Dentre os resultados gerados estão as previsões sazonais, sub sazonais e de até 15 dias de vazão, acumulação de chuva, resumo de inundações, avaliação do desempenho das previsões geradas, entre outras.

O sistema torna-se um aliado importante para a tomada de decisão em eventos de cheias e auxilia países com pouco monitoramento a obterem informações hidrológicas. A Figura 2.14

mostra a plataforma com os resultados de previsão de inundação em um horizonte de 15 dias, para a rede de drenagem, com foco no estado do Rio Grande do Sul. Os resultados de resumo de inundação sintetizam as previsões de cheias com diferentes graus de severidade e probabilidade, dividindo em inundações com tempo de retorno (TR) de 2 anos em amarelo, 5 anos em vermelho e 20 anos em roxo. Além disso, dentro de cada uma das classificações existem variações de cor de acordo com o impacto e a magnitude da inundação prevista. Para o continente europeu existe um sistema operacional muito similar ao GloFAS, o EFAS (*European Flood Awareness System*), com algumas informações adicionais como previsão de cheias repentinas.

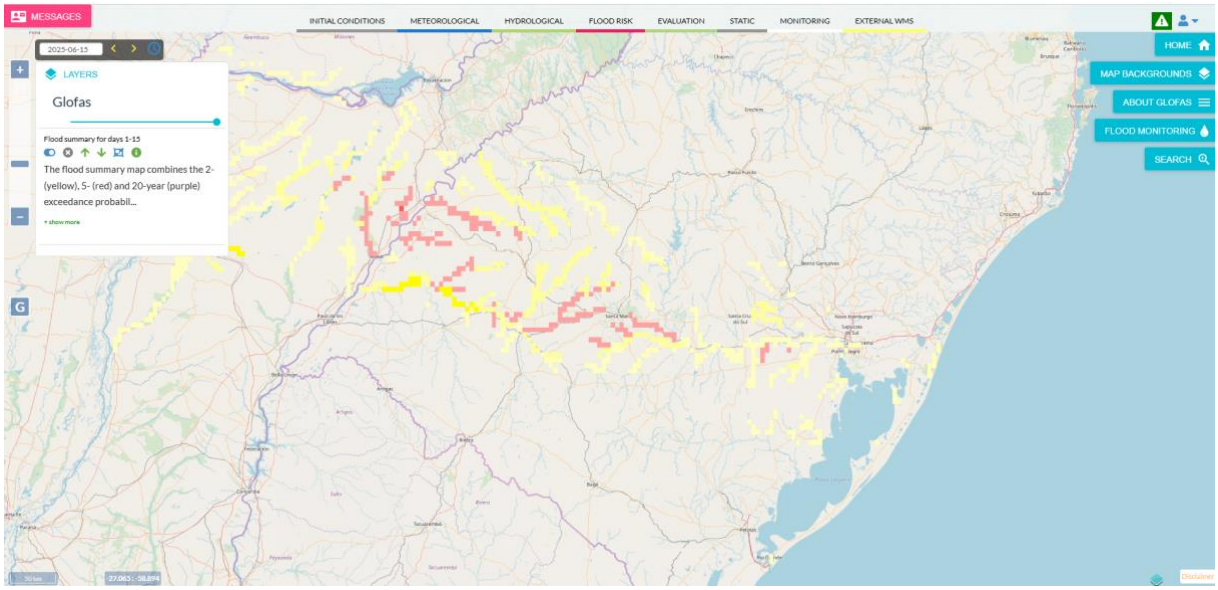

Figura 2.14. Plataforma GloFAS com a previsão de inundação, visualizado dia 15/06/2025.
Disponível em: https://global-flood.emergency.copernicus.eu/glofas-forecasting/

2.5.2 Sistemas de previsão no Brasil a nível nacional

Além desse sistema global, vários países têm os seus próprios sistemas de previsão, como é o caso dos Estados Unidos, Reino Unido, Itália, Bangladesh, França, Finlândia, Austrália, Alemanha, entre outros (Pappenberger et al., 2014). No Brasil o CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais) disponibiliza boletins contendo informações sobre o risco hidrológico para todo o país, classificando em baixo, moderado, alto e muito alto. Esses boletins identificam as regiões que estão suscetíveis a ocorrência de eventos de cheia, como inundações graduais, bruscas e alagamentos, com base nos acumulados previstos para as próximas 48h. Não são fornecidos detalhes, como os níveis que os rios alcançarão, áreas inundadas ou a quantidade de precipitação acumulada prevista. A Figura 2.15

mostra um exemplo de boletim, emitido no dia 01/05/2024. Além do boletim hidrológico, também é emitido um de risco geológico, que informa regiões que podem estar suscetíveis a movimentos de massa.

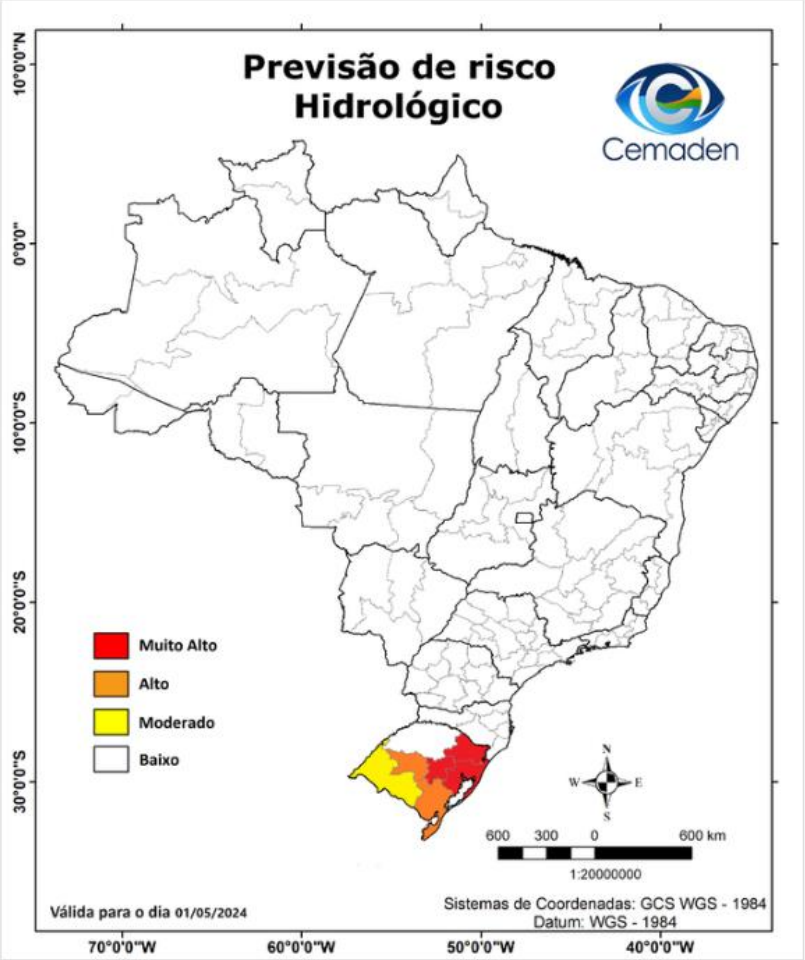

Figura 1 - Possibilidade de ocorrência de eventos hidrológicos em ao menos um municipio das mesorregiões indicadas. Este mapa é elaborado por uma equipe multidisciplinar, levando em consideração os cenários de riscos hidrológicos atuais somados à previsão de chuva.

Figura 2.15. Boletim emitido pelo CEMADEN em 01/05/2024.

Disponível em: https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/riscos-geo-hidrologicos/01-05-2024-previsao-de-riscos-geo-hidrologicos

O Serviço Geológico do Brasil (SGB) disponibiliza, através da plataforma SACE "Sistema de Alerta de Eventos Críticos", informações de vários Sistemas de Alerta Hidrológico (SAHs). Nos SAHs são realizadas previsões em tempo real para pontos monitorados em 18 bacias hidrográficas, iniciando em 1989 na bacia do rio Amazonas e terminando em 2025 na bacia do rio Guaíba. A seguir as bacias monitoradas em ordem crescente de acordo com o seu ano de início de operação: rio Amazonas, rio Paraguai (Pantanal), rio Doce, rio Caí, rio Muriaé, rio Acre, rio Madeira, rio Parnaíba, rio Taquari, rio Branco, rio Xingu, rio Mandaú, rio Uruguai,

rio das Velhas, rio Itapecuru, rio Pomba, rio São Francisco e rio Guaíba. O sistema inicia com o recebimento dos dados dos pontos monitorados pelo SGB, que são consistidos e processados, e usados como dados de entrada em modelos hidrológicos desenvolvidos pela equipe técnica da própria instituição.

Os resultados são emitidos em forma de boletins, que são usados pela Defesa Civil de cada região como fonte de informação para a tomada de decisão durante eventos de cheia. Cada uma das bacias apresenta uma lista com os municípios atendidos, boletins, publicações, mapeamento de risco, características da bacia, apresentação e os dados de todas as estações monitoradas em uma plataforma interativa. No próximo subcapítulo serão apresentados mais detalhes sobre o funcionamento do SACE. A Figura 2.16 mostra todas as bacias que faze parte do SAH:

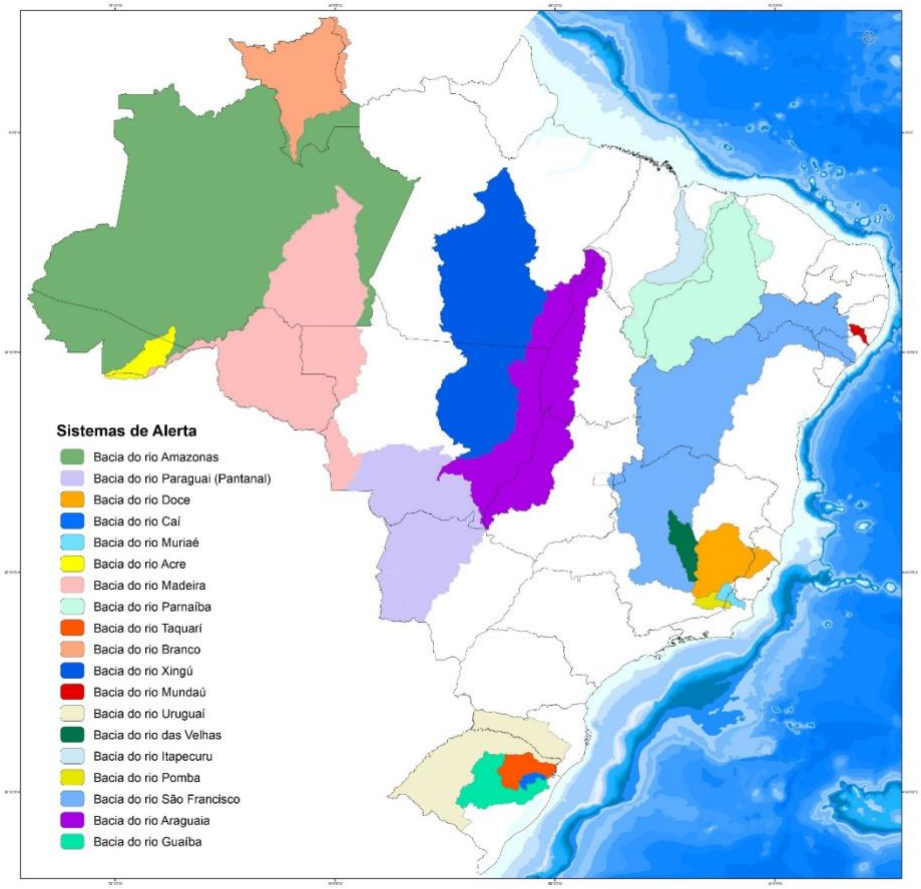

Figura 2.16. Bacias monitoradas no SACE do SGB.

Disponível: https://www.sgb.gov.br/sace/index_bacias_monitoradas.php#

Destaca-se que os exemplos de sistemas de previsão e de ferramentas de apoio aos sistemas citados nesse capítulo são exemplos que estão funcionando atualmente, porém existem vários outros no mundo e no Brasil que já estiveram em operação/ que estão funcionando e que

não foram citados. Como exemplo são os sistemas de previsão de apoio a operação de reservatórios de empreendimentos hidrelétricos e as iniciativas estaduais e municipais de monitoramento meteorológico e previsão, como as salas de situação estaduais.

2.5.2 Sistemas de previsão no RS

Alguns trabalhos disponíveis na literatura já propuseram sistemas de previsão para o RS, como o caso de Siqueira et. al. (2016), que desenvolveu um sistema de previsão para a bacia hidrográfica do rio Taquari, usando o modelo MGB e dados de chuva prevista. Como resultado do trabalho foram geradas previsões por *ensemble*, onde os picos de vazão foram relativamente bem previstos para as antecedências analisadas e na maior parte das previsões pelo menos um dos membros indicava a ocorrência da cheia, com a vazão de pico próxima ao observado. Dessa forma, identificou-se um benefício no uso das previsões por conjunto, possibilitando o suporte a Defesa Civil na emissão de pré-alertas.

Já para a bacia do rio Uruguai o trabalho de Fan et. al. (2017) apresentou a operação de um sistema de previsão com foco nos reservatórios das usinas hidrelétricas de Barra Grande e Campos Novos. Foi usado o modelo MGB, com informações de chuva prevista e assimilação em tempo real. Como resultado observou-se pelas métricas de análise que é possível prever a ocorrência de inundações com 2 a 3 dias de antecedência.

Durante o desastre ocorrido nos meses de abril e maio de 2024 iniciativas de previsão trabalharam para prever o comportamento futuro dos rios do estado. As principais iniciativas serão apresentadas a seguir, mas é importante ressaltar que existem outras que funcionaram durante o evento no estado e não serão citadas.

Na cheia de 2024 o sistema de previsão operacional quantitativo em vigor no estado, o Sistema de Alerta de Cheias (SACE), do Serviço Geológico Brasileiro (SGB), gerou previsões de níveis para as bacias dos rios Taquari, Caí e Uruguai com base em dados medidos pelas estações telemétricas. São usados modelos hidrológicos de base empírica, compostos por equações de regressão linear simples e múltipla e modelos do tipo redes neurais artificiais.

O SACE trabalha com limiares de atenção, alerta e inundação, que variam de acordo com cada estação. A cota de atenção representa uma possibilidade moderada de ocorrência de inundação, a cota de alerta indica possibilidade elevada de inundação (quando atingida é iniciada a emissão de boletins e a Defesa Civil é acionada) e a cota de inundação, que indica a

primeira residência a ser atingida pela inundação, cota em que o primeiro dano é observado no município.

Na bacia do Rio Uruguai o Sistema de Alerta Hidrológico (SAH) entrou em operação no ano de 2018, sendo implementado e operado pelo SGB, contando com 32 estações de monitoramento hidrometeorológico, e realizando previsões para 6 municípios. As antecedências das previsões variam de 4 a 17h, para os seguintes municípios: Uruguaiana, Itaqui e Passo São Borja (rio Uruguai), Manoel Viana (rio Ibicuí), Alegrete (rio Ibirapuitã) e Rosário do Sul (rio Santa Maria). Desde o início da sua operação o sistema já emitiu 602 boletins (2018-2023), sendo 295 desses emitidos no ano de 2023 (Mattiuzi e Matos, 2023). No ano de 2024 foram emitidos 212 boletins.

Na bacia do rio Caí o SAH entrou em operação no ano de 2012, sendo o ano de 2018 com o maior número de boletins emitidos (81) até o ano de 2021. O sistema de previsão é composto por 8 pontos de monitoramento que fazem previsão com antecedência de até 10 horas para os municípios de Montenegro e de São Sebastião do Caí. Na cidade de São Sebastião do Caí a cota de início de inundação (1.000 cm) não foi ultrapassada somente em 12 anos, analisando o período de 1947 a 2021. Na cidade de Montenegro, o cenário é muito parecido, e no período de 1940 a 2021 a cota de início de inundação (600 cm) também não foi ultrapassada em 12 anos (Silva e Matos, 2021). Nos anos de 2022, 2023 e 2024 foram emitidos, respectivamente, 42, 134 e 44 boletins.

O SAH da bacia do rio Taquari entrou em operação no ano de 2015, e até o ano de 2022 já tinha emitido 148 boletins, sendo 54 deles no ano de 2020 (Silva e Matos, 2022). São 16 estações de monitoramento, que fazem previsão com antecedências que variam de 4 a 6 h para os munícipios de Estrela, Lajeado, Encantado, Muçum e Santa Tereza, todas localizadas ao longo do rio Taquari. Nos anos de 2023 e 2024 foram emitidos, respectivamente, 57 e 54 boletins, conforme dados da plataforma SACE (SGB, 2025).

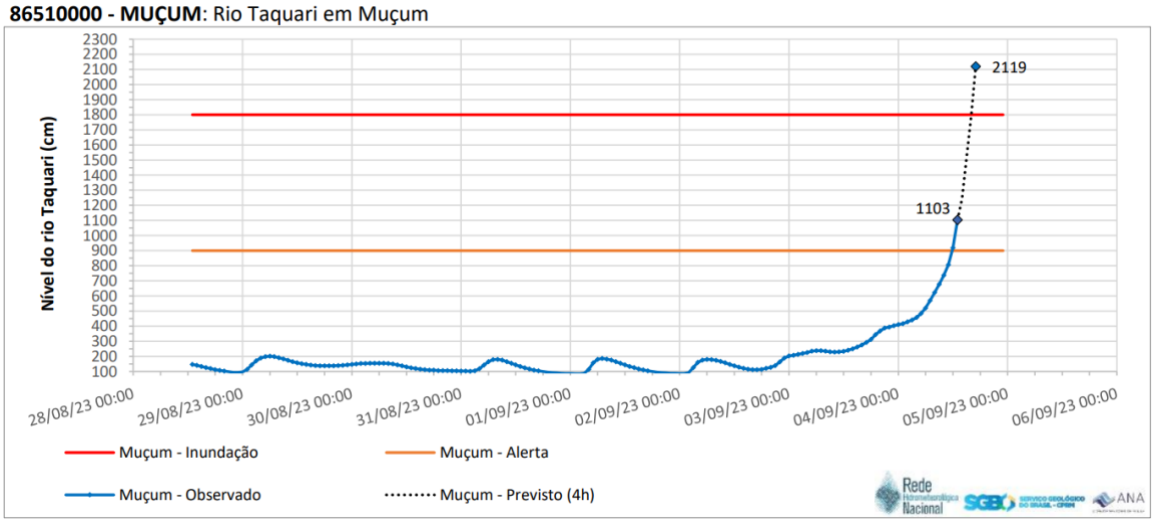

Figura 2.17. Boletim emitido pelo SAH da bacia do rio Taquari em 04/09/2023 às 13h para a cidade de Muçum.

A Sala de Situação do estado do Rio Grande do Sul é um centro de monitoramento e previsão vinculada à Secretaria de Meio Ambiente e Infraestrutura (SEMA) e à ANA, que busca gerar subsídios para a tomada de decisão da Defesa Civil do estado. As previsões não são quantitativas, e informam sobre o risco hidrológico previsto para as bacias hidrográficas presentes no Rio Grande do Sul Hidrológico (RSH), através de boletins que informam áreas com maior e com menor risco hidrológico a eventos como inundações e enxurradas. Para gerar as previsões é usado o modelo MGB, que é um modelo hidrológico com módulo hidrodinâmico, de base física, distribuído, que simula os processos hidrológicos que ocorrem em bacias hidrográficas de grande escala (Collischonn et al., 2007). Ele apresenta uma versão calibrada e validada para o RSH, com um módulo de previsão, capaz de incluir previsões de chuva de diferentes bases de dados (Giacomelli et al., 2019).

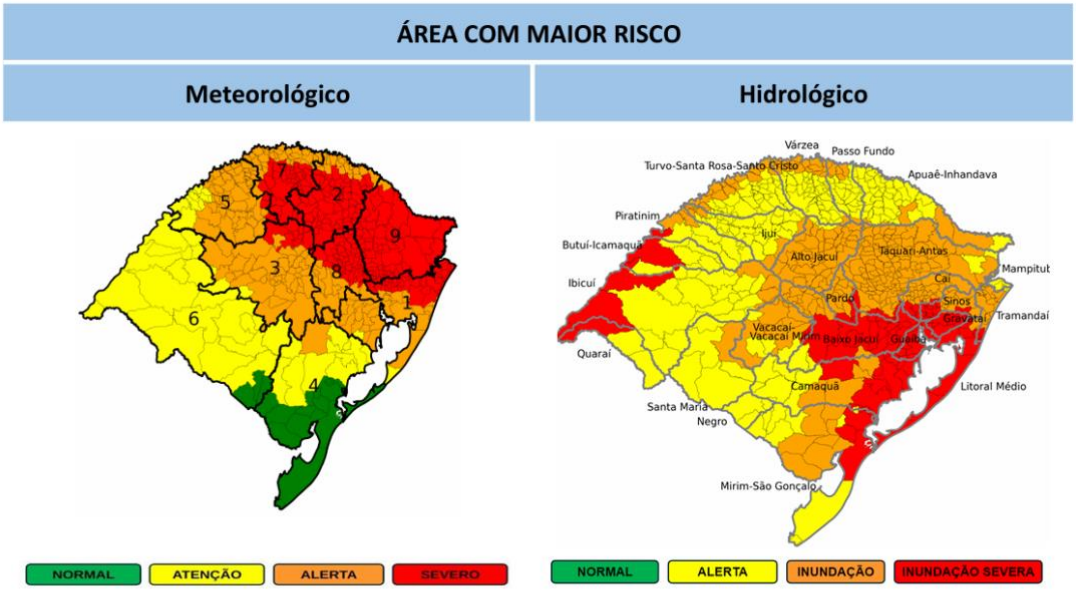

Figura 2.18. Exemplo de boletim hidrológico emitido pela sala de situação.

De maneira extraordinária, durante o evento de cheia dos meses de abril e maio de 2024, pesquisadores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) começaram a gerar previsões de níveis para o rio Guaíba. As previsões eram resultado da combinação de uso de um modelo hidrológico e um modelo hidrodinâmico, respectivamente, o Modelo de Grandes Bacias (MGB) (Collischonn et al., 2007) adaptado para gerar previsões para o RSH e modelo HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*) (USACE, s.d.) com previsões meteorológicas em nível global e dados de monitoramento hidrológico (Medeiros et al., 2024).

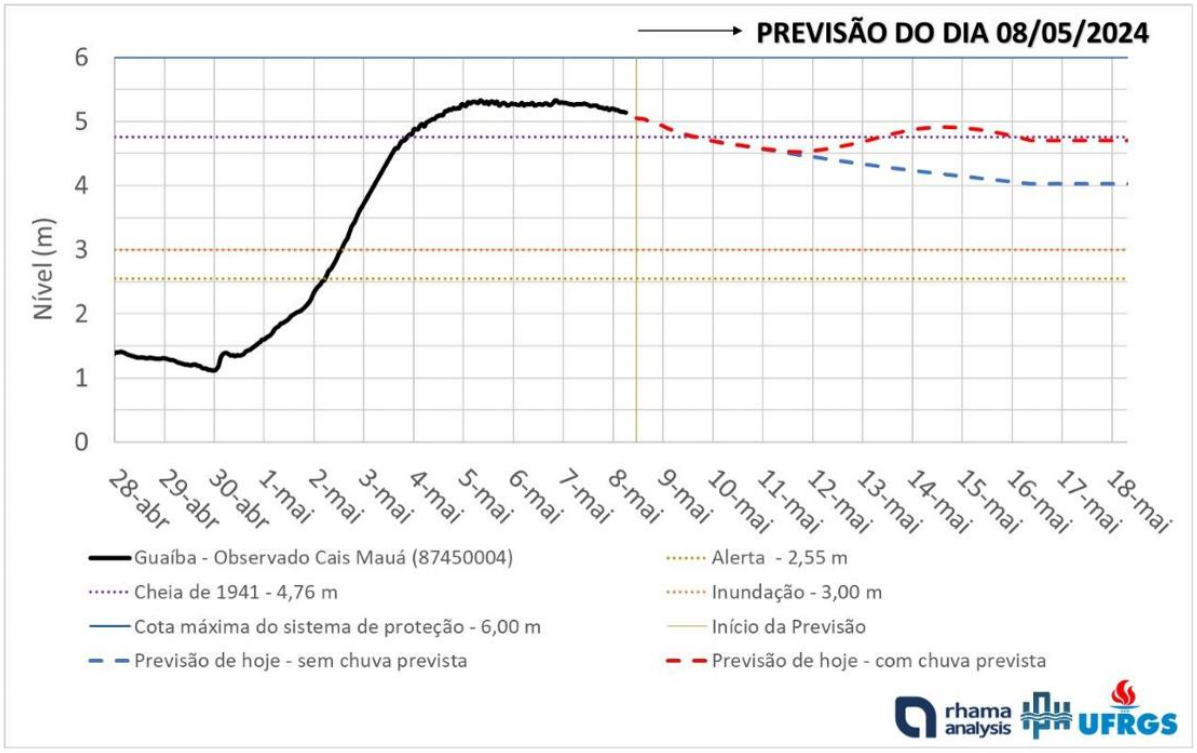

Figura 2.19. Previsão realizada em 08/05/2024 pelo IPH.

Disponível em: https://www.ufrgs.br/iph/previsoes-atualizadas-de-niveis-dagua-no-guaiba-quarta-feira-08-05-24-12h/

As previsões foram bem-sucedidas e proporcionaram a população informações sobre os níveis que o rio Guaíba iria chegar em um horizonte de 15 dias. Essas informações foram muito valiosas, auxiliando na tomada de decisão e na mitigação dos impactos causados pela cheia (Medeiros et al., 2024; Sampaio Medeiros et al., 2025). O modelo usado para fazer as previsões pode ser considerado como um marco de sucesso e um exemplo a ser seguido na implementação de futuros sistemas de previsão (Collischonn et al., 2025).

3. METODOLOGIA

A metodologia inicia com a apresentação dos modelos utilizados para a geração das previsões: os modelos empíricos e o modelo MGB previsão. Na sequência, é descrito o método de concepção dos modelos empíricos, bem como a análise comparativa dos resultados obtidos por ambos os modelos para um horizonte de previsão de até 24 horas. Posteriormente, é apresentado o processo de acoplamento dos resultados dos dois modelos, resultando em uma única previsão. Por fim, são detalhadas as métricas empregadas na análise dos resultados. A Figura 3.1 exemplifica a metodologia através de um fluxograma:

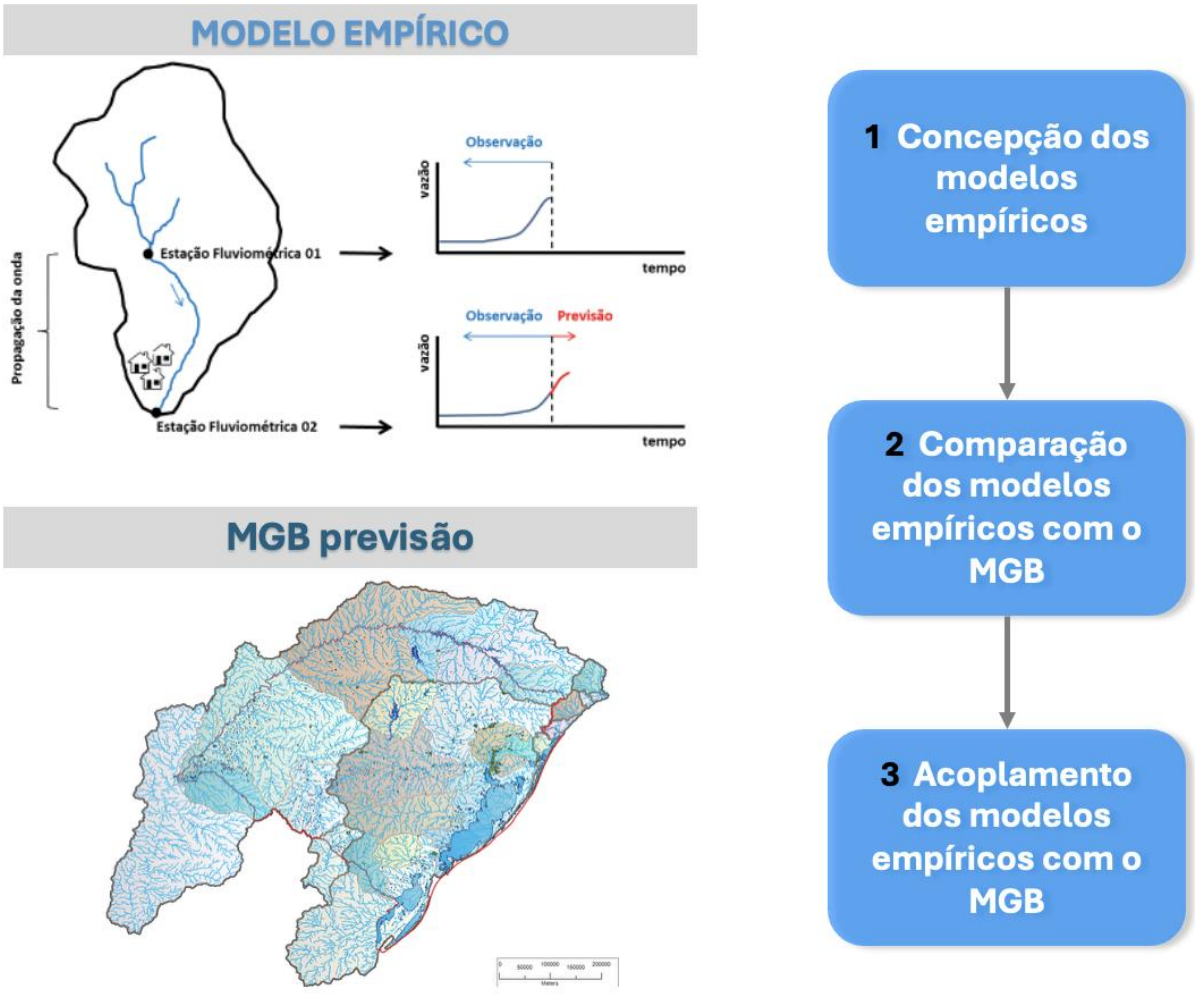

Figura 3.1. Fluxograma da metodologia aplicada no trabalho.

3.1 Modelos Usados

Nesse trabalho são geradas previsões usando dois modelos, os modelos empíricos e o modelo MGB no módulo previsão. Os modelos empíricos são capazes de representar a propagação da onda de cheia em uma bacia hidrográfica usando como informações de entrada os dados observados em postos fluviométricos ao longo dos trechos de rio analisados. O segundo modelo é o MGB previsão, que é um modelo hidrológico e hidrodinâmico que apresenta um módulo de previsão para a região do Rio Grande do Sul Hidrológico (RSH), usando dados de chuva prevista.

A principal diferença entre os modelos está associada ao seu funcionamento interno, já que os modelos empíricos podem ser classificados como modelos de cunho estatístico, que representam associações entre as variáveis utilizadas. Já o modelo MGB é um modelo de base física, capaz de representar como ocorre a propagação da onda de cheia na bacia hidrográfica. Essa diferença reflete-se nos horizontes de previsão, já que nos modelos empíricos os horizontes são de poucas horas (gerando previsões de curto prazo), enquanto no modelo MGB as previsões são de médio prazo, abrangendo um horizonte de até 15 dias. A seguir serão apresentadas as principais características de cada um dos modelos.

3.1.1 Modelos empíricos

Os modelos empíricos realizam associações estatísticas entre séries de dados. Nesse trabalho, utiliza-se uma adaptação do modelo de diferenças, já que ele representa um modelo hidrológico simplificado, que permite manter sempre um padrão para o funcionamento do modelo empírico. No modelo de diferenças a previsão é obtida a partir da variação recente dos níveis entre o instante atual e um instante defasado de h horas. A adaptação consiste em permitir que os coeficientes ajustados assumam sinais positivos ou negativos, de modo a representar, de forma estatística, a influência combinada das estações a montante e do comportamento recente na estação de jusante (que corresponde ao ponto onde são geradas as previsões). Assim, o modelo descreve a relação entre as séries observadas nas estações de montante e a série no ponto de previsão, sem representar explicitamente os processos físicos do escoamento.

A Equação (1 apresenta a formulação generalizada para um trecho de rio com n estações a montante, localizadas no canal principal ou em afluentes (adaptada de Tucci, 2005):

$$P_{t+h} = P_t + \sum_{n=1}^{n} a_n(M_{n,t} - M_{n,t-h}) + b(P_t - P_{t-h}) + c \quad (1)$$

Onde: P é o valor da previsão; h é o horizonte de previsão; t é o instante de emissão da previsão; P_t e P_{t-h} são os níveis observados no ponto de previsão nos instantes t e $t-h$; $M_{n,t}$ e $M_{n,t-h}$ são os níveis na n-ésima estação de montante nos instantes t e $t-h$; a_ne b são coeficientes calibrados; e c é o termo independente.

Dessa forma, observa-se que o número de parâmetros pode variar de acordo com o número de estações escolhidas para fazerem parte do trecho de rio analisado.

3.1.2 MGB

O Modelo de Grandes Bacias (MGB) é um modelo hidrológico semi-distribuído, que simula os processos hidrológicos em bacias hidrográficas de grande escala. Ele representa o balanço hídrico do solo e o balanço de energia e evapotranspiração ao nível das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs). A geração e a propagação dos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo ocorrem ao nível das minibacias discretizadas pelo modelo. Por fim, é simulada a propagação da vazão na rede de drenagem (Collischonn et al., 2020a). A Figura 3.2 mostra um resumo do funcionamento do MGB:

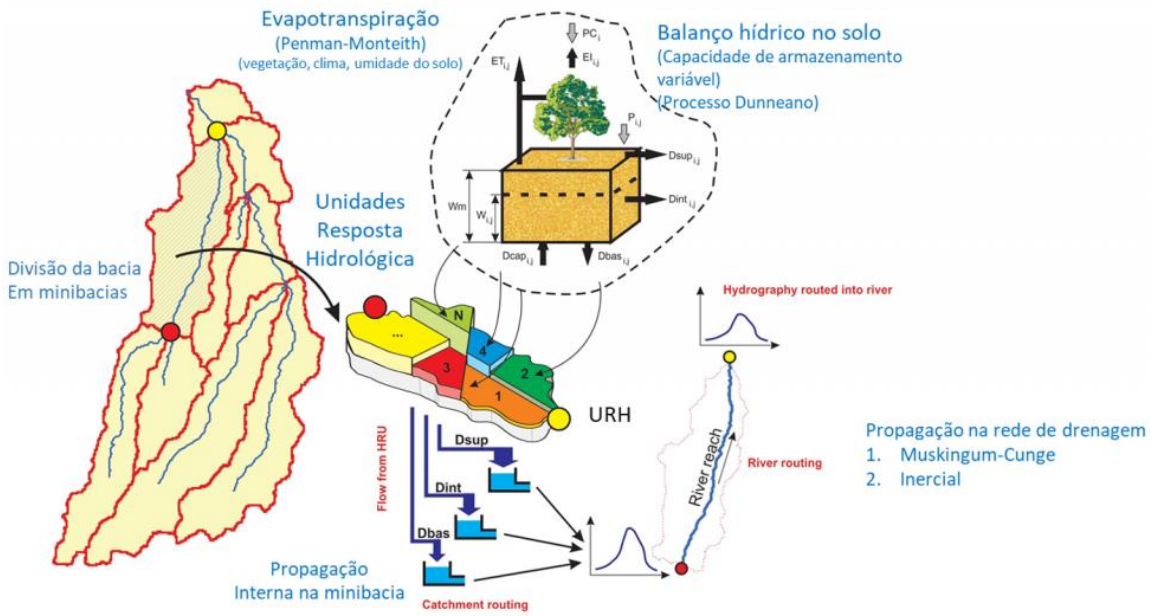

Figura 3.2. Representação do funcionamento do modelo MGB.

Fonte: https://www.ufrgs.br/hge/mgb/o-que-e/

O modelo possui uma versão adaptada para a geração de previsões no denominado Rio Grande do Sul Hidrológico (RSH), que corresponde à região hidrográfica do estado do Rio Grande do Sul, estendendo-se para além de seus limites administrativos. Fan et al. (2021) descrevem o desenvolvimento do modelo e sua aplicação na geração de manchas de inundação. Complementarmente, Sampaio Medeiros et al. (2025) apresentam as previsões realizadas com o modelo MGB durante os eventos de cheia ocorridos nos anos de 2023 e 2024. Por sua vez, Paiva et al. (2025b) apresentam uma versão do MGB aplicada ao RSH, na qual é realizada a caracterização regional das cheias observadas no estado do Rio Grande do Sul nos anos de 2023 e 2024.

A discretização espacial do modelo foi realizada a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Farr et al., 2007), com resolução espacial de 90 m e resolução vertical de 1 m. Dessa forma, ele foi dividido em 8649 minibacias (com mais de 50% delas com área de drenagem variando de 50 a 100 Km²) e 30 sub-bacias. A Figura 3.3 mostra a discretização das minibacias.

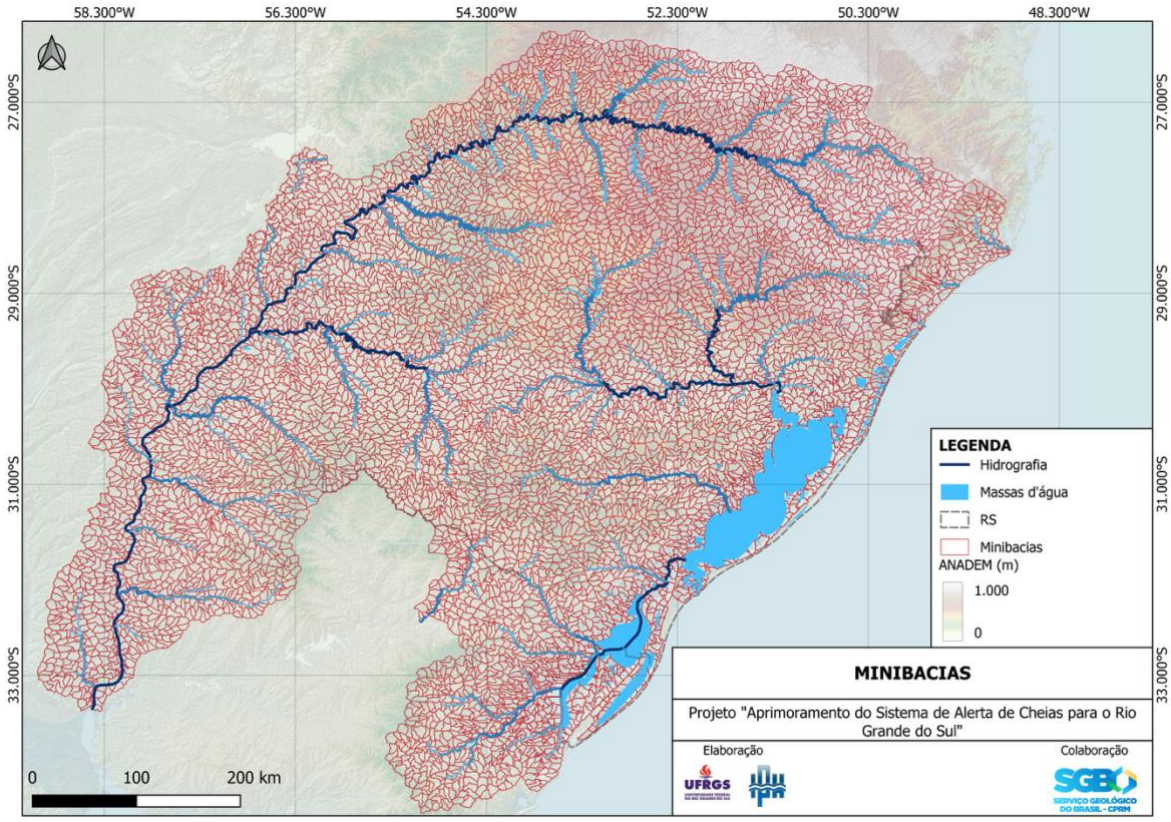

Figura 3.3. Minibacias do modelo MGB para o RSH.
Fonte: IPH (2025c)

Na sua versão mais recente, as relações cota–área passaram a ser derivadas do Modelo Digital de Terreno (MDT) ANADEM (Laipelt et al., 2024), que apresenta resolução espacial mais detalhada (30 m). O ANADEM foi desenvolvido a partir da remoção do efeito da vegetação do MDE Copernicus GLO-30 (COPDEM), sendo específico para a região da América do Sul.

Atualmente, o modelo com foco em previsão vem sendo aprimorado e complementado no contexto do projeto "Aprimoramento do sistema de alerta de cheias para o Rio Grande do Sul hidrológico"[1], desenvolvido pelo IPH para o SGB (IPH, 2025a). Entre as principais modificações, destaca-se a inclusão do método de propagação inercial, que permite simular trechos de rios com baixas declividades, considerando o efeito das planícies de inundação. Essa modificação possibilitou a geração de previsões de níveis, funcionalidade essencial para esse trabalho. Adicionalmente, a aplicação do conceito de HAND e topografia de inundação permitiu a geração de manchas de inundação ao modelo. Foram também incluídas condições de contorno no exutório da Laguna dos Patos, por meio de um curva-chave, bem como a substituição das vazões defluentes de UHEs, com o objetivo de representar as regras de operação dos reservatórios. Por fim, foram incorporados os efeitos do vento nas regiões do Guaíba e da Laguna dos Patos, áreas fortemente influenciadas por ventos fortes que geram oscilações dos níveis. Informações mais detalhadas podem ser acessadas em IPH (2025a).

No contexto do projeto, incluindo as novas modificações, o modelo foi simulado de janeiro de 2018 a agosto de 2025. Foi considerado um período de aquecimento de 3 meses, e a calibração foi realizada de abril de 2018 a agosto de 2025. Após a calibração as métricas de desempenho mostraram coeficientes de Nash-Sutcliffe e KGE superiores a 0,7 em muitos pontos de interesse para previsão, como nos Rios Guaíba, Uruguai e Taquari-Antas (IPH, 2025a).

O modelo no módulo previsão conta com o uso de informações recentes de estações hidrometeorológicas, atualizando-o com dados de chuva, nível e vazão cada vez que é rodado. As estações telemétricas usadas no modelo passaram por uma metodologia de filtragem (IPH, 2025a), e nas regiões do RSH que não contam com monitoramento representativo, foram incluídas estações virtuais com dados do produto de chuva de satélite IMERGE (IPH, 2025b).

Além dessas, também são utilizadas informações de precipitação prevista como dados de entrada, geralmente obtidos a partir do portal Sintegre no Brasil, uma plataforma do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que disponibiliza dados de previsão de chuva

[1] AIP-003056 "Aprimoramento de sistema de alerta de cheias para o Rio Grande do Sul hidrológico".

em um horizonte de até 15 dias de diferentes modelos meteorológicos: ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), GEFS (Global Ensemble Forecast System) e ETA (Estimated Time of Arrival). A Figura 3.4 mostra o resumo do funcionamento do MGB previsão, dividindo-o em duas partes principais, o download e análise dos dados de entrada e a modelagem hidrológica e hidrodinâmica:

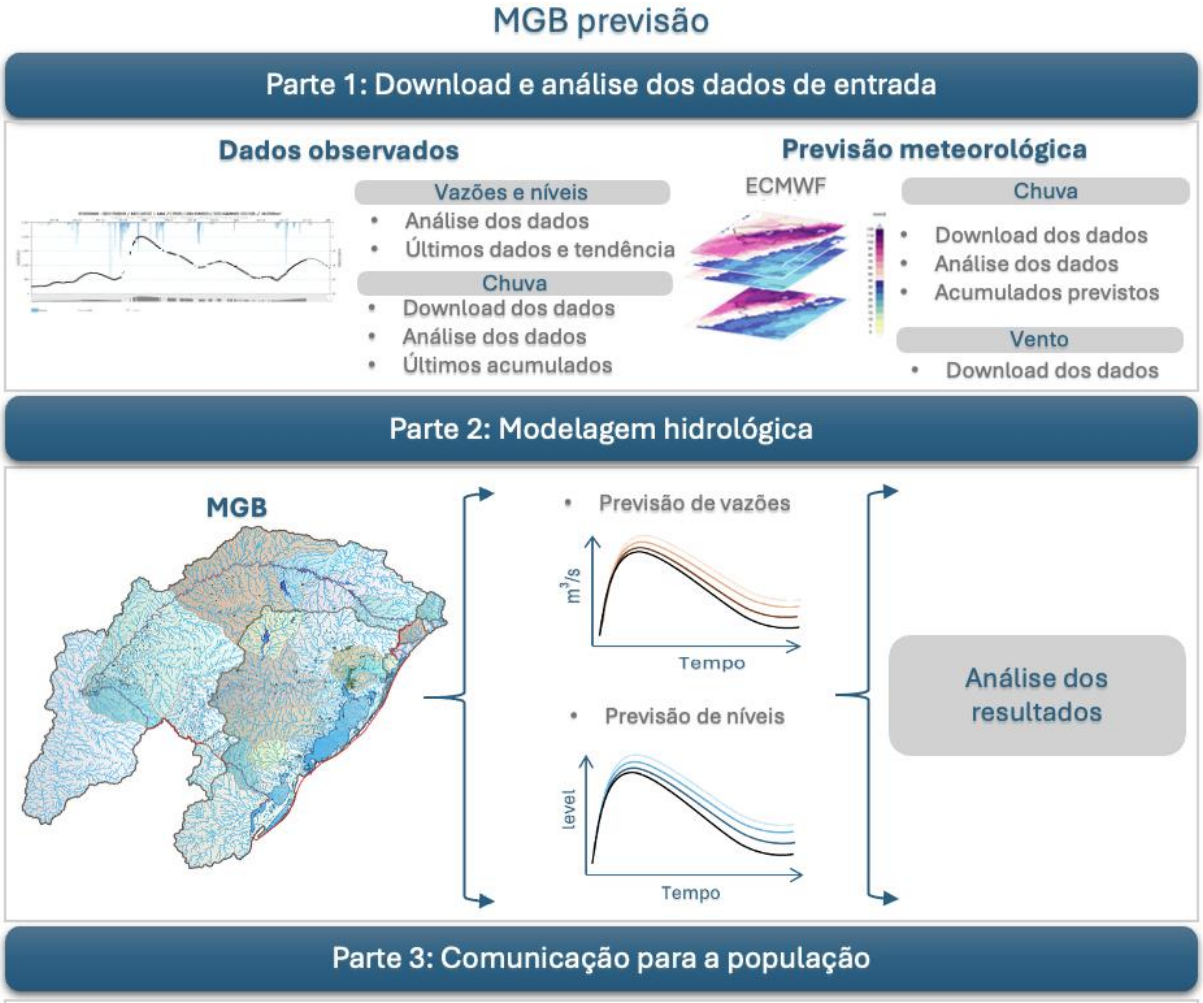

Figura 3.4. Resumo do funcionamento do MGB previsão.
Fonte: Adaptado de Sampaio Medeiros (2025).

3.2 Experimentos realizados

A seguir são apresentados os experimentos realizados, iniciando com o desenvolvimento de um método robusto para a concepção de modelos empíricos. Na sequência são comparados os resultados obtidos pelos modelos empíricos com os resultados do modelo MGB previsão em um horizonte de até 24 horas, seguido pela apresentação da metodologia de acoplamento dos resultados de ambos os modelos. Os experimentos foram aplicados nos períodos dos últimos grandes eventos de inundação que ocorreram no RS, correspondendo aos meses de setembro e

novembro de 2023, abril e maio de 2024 e junho e julho de 2025, variando de acordo com a disponibilidade dos dados observados por evento em cada estação.

3.2.1 Concepção de modelos empíricos

Nos relatórios técnicos de operação desenvolvidos pelo SGB para as bacias em que são operados os SAHs no estado do Rio Grande do Sul, são apresentadas as metodologias de geração das previsões. Nas bacias dos rios Uruguai e Taquari as previsões dos níveis são geradas através de regressões lineares simples e múltiplas, usando dados de nível de estações telemétricas como informações de entrada nos modelos. As equações de regressão utilizadas para a geração dos níveis não são apresentadas no relatório. Na bacia do rio Caí as previsões de níveis também são geradas usando mais um tipo modelo empírico, as redes neurais artificiais.

Desse modo, o presente trabalho busca desenvolver modelos empíricos com desempenho similar aos do SGB, para as seguintes bacias de atuação dos SAHs no RS: Uruguai, Taquari e Caí. Em complemento, também serão desenvolvidas equações de previsão de níveis para as bacias dos rios do Sinos e Jacuí, que atualmente não contam com SAHs operados pelo SGB, chamadas nesse trabalho de pontos piloto. A Figura 3.5 mostra todos os pontos usados nos modelos empíricos.

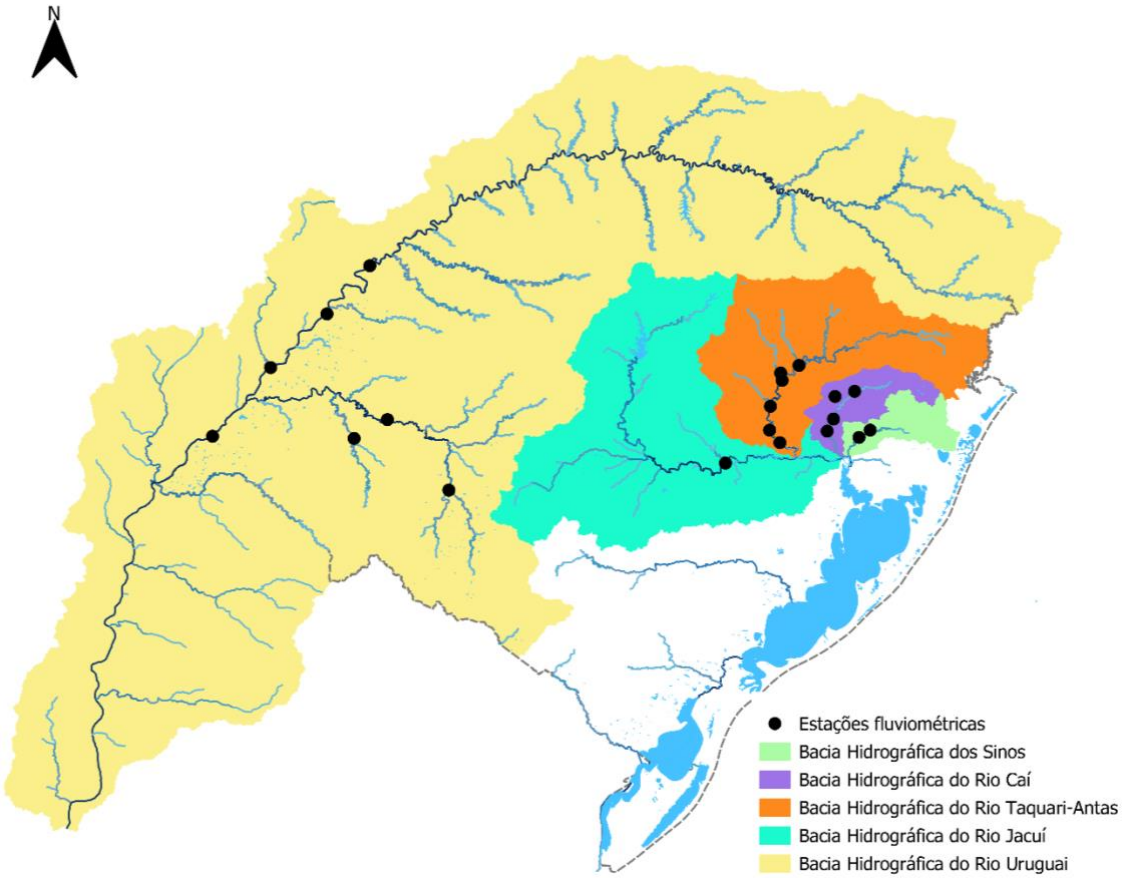

Figura 3.5. Pontos de previsão no Rio Grande do Sul Hidrológico.

Nos pontos de previsão que fazem parte dos SAHs as previsões foram geradas com os mesmos horizontes usados operacionalmente. Nas bacias dos rios dos Sinos e Jacuí o horizonte de previsão foi determinado por meio da análise da autocorrelação temporal. Foram avaliadas defasagens sucessivas da série observada, buscando identificar a maior defasagem em que a correlação linear com a série original permanecia elevada.

A metodologia de aplicação do modelo de diferenças inicia com a seleção das estações já utilizadas nos pontos em que existem SAHs. Nos pontos pilotos as estações foram selecionadas de acordo com a disponibilidade de dados e com a sua localização. Após isso ocorre a criação das séries históricas das estações selecionadas, com discretização horária, utilizando a informação de nível da hora exata. Nos casos em que não existem informações disponíveis da hora exata, é realizada a média dos valores disponíveis para representar aquele horário, com agregação *right label*, que corresponde a usar os dados disponíveis na última hora de medição.

Além dos níveis, também são necessários os valores das cotas de atenção, alerta e inundação das estações, obtidas através do site do SACE (SGB, 2025). A partir desse ponto é identificado o período concomitante de dados entre todas as estações, para cada ponto de

previsão, selecionando os níveis que estão acima da cota de atenção, alerta e inundação na estação de jusante e que não apresentam falhas em nenhuma das estações. A partir desses critérios, a calibração do modelo foi realizada com diferentes cenários, cuja seleção dos dados varia de acordo com o limiar escolhido. Dessa forma, para cada limiar foram utilizados os dados que iniciam e terminam no mesmo limiar ou que iniciam no limiar e terminam no pico do evento.

Além disso, a seleção dos eventos considerou critérios de consistência temporal e disponibilidade de dados. Os eventos foram definidos como trechos contínuos da série, separados por descontinuidades superiores a dois dias. Em seguida, foram mantidos apenas os instantes em que o nível observado na estação de jusante estava acima do limiar do cenário analisado e em que todas as séries de montante utilizadas apresentavam dados válidos no mesmo instante. A partir desse conjunto filtrado, na análise limiar–limiar o evento é mantido em toda a sua extensão temporal disponível (fase de subida e recessão), enquanto na análise limiar–pico o evento é recortado no instante de ocorrência do pico observado na estação de jusante, preservando apenas o trecho de subida do hidrograma.

A análise limiar-pico pode resultar em um número maior de eventos válidos em comparação à análise limiar–limiar, pois possíveis falhas de dados, lacunas temporais ou interrupções de telemetria que ocorram após o pico não comprometem a utilização do trecho de subida do hidrograma. A Quadro 3.1 e a Figura 3.6 mostram os cenários testados:

Quadro 3.1. Cenários testados com os modelos empíricos.

Cenários	**Início**	**Fim**
AT_AT	Primeira vez que é alcançada a cota de atenção	Última vez que é alcançada a cota de atenção após o pico
AL_AL	Primeira vez que é alcançada a cota de alerta	Última vez que é alcançada a cota de alerta após o pico
IN_IN	Primeira vez que é alcançada a cota de inundação	Última vez que é alcançada a cota de inundação após o pico
AT_P	Primeira vez que é alcançada a cota de atenção	Pico do evento
AL_P	Primeira vez que é alcançada a cota de alerta	
IN_P	Primeira vez que é alcançada a cota de inundação	

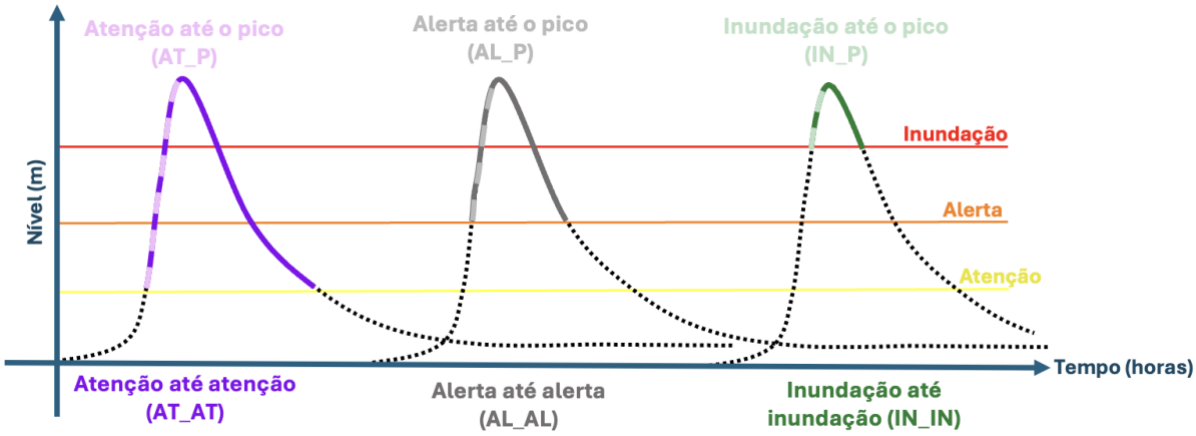

Figura 3.6. Cenários utilizados na calibração dos modelos empíricos.

Os dados selecionados são divididos em eventos de cheia, usando um intervalo de 2 dias para separá-los. Dessa forma, os eventos de calibração podem iniciar na primeira data do período concomitante entre as estações, e terminar antes do início de cada um dos eventos de validação. A data final da calibração corresponde a seguinte equação, em que h corresponde ao horizonte da estação:

$$Final\ calibração: início\ do\ evento\ de\ validação - 2 * h + 1 \quad (2)$$

Observa-se que o final da calibração ocorre uma hora antes do período necessário para rodar uma previsão (correspondendo ao início do evento de validação). Essa escolha foi feita pensando que em um sistema operacional pode ser útil calibrar o modelo com dados imediatamente anteriores ao momento em que se decide iniciar uma previsão. A Figura 3.7 mostra a série histórica de dados observados para a estação 86510000, e a seleção dos eventos de cheia feita no período de calibração. São apresentados os eventos escolhidos de acordo com cada limiar e com os dados selecionados, iniciando em um limiar e indo até esse limiar ou iniciando em um limiar e indo até o pico. Observa-se que alguns eventos param de medir em algum momento, não retornando até o ponto final do limiar. Isso acontece já que não é uma regra obrigatória retornar até o limiar para ser escolhido, mas sim estar acima do limiar analisado.

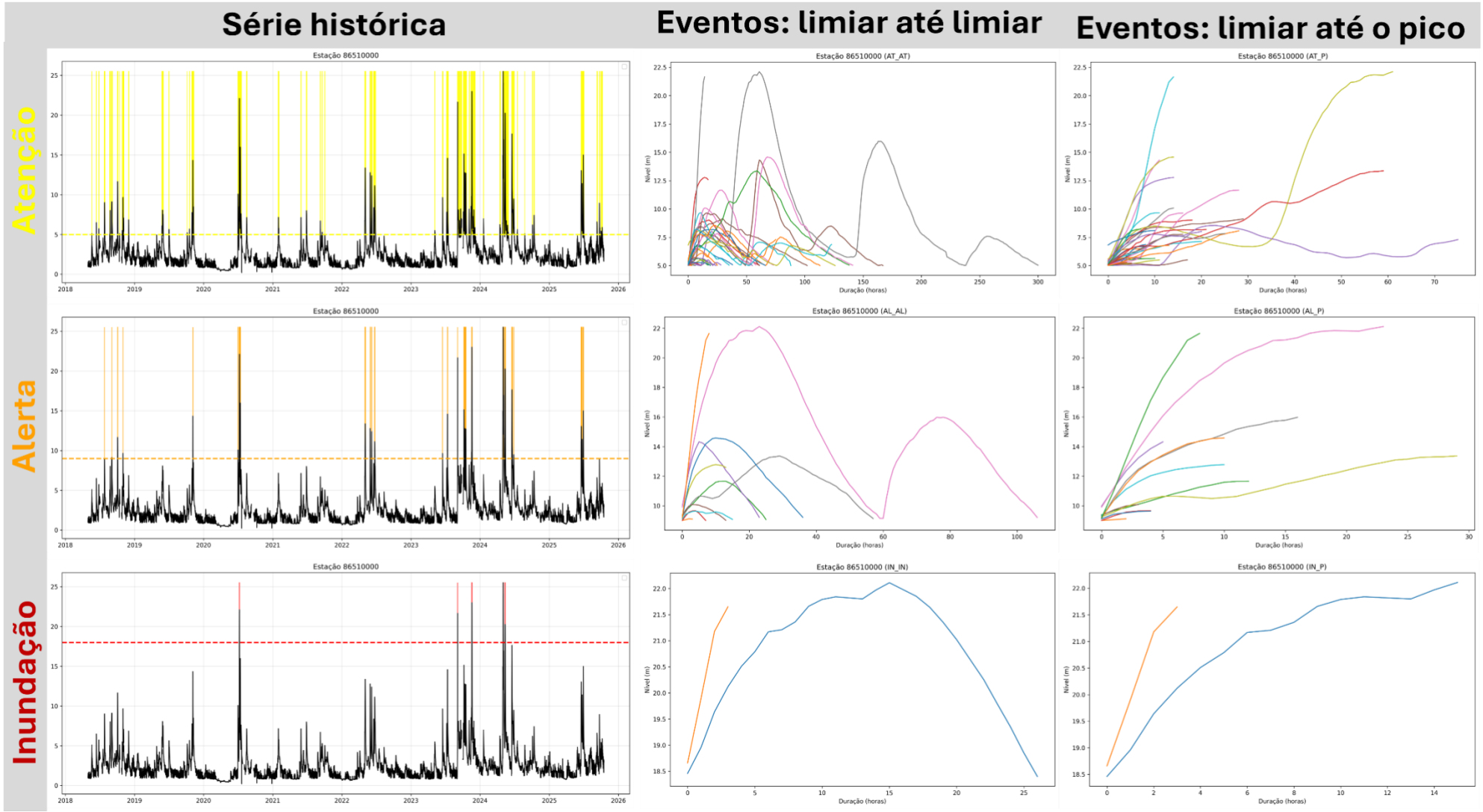

Figura 3.7. Exemplo de seleção dos eventos para os limiares de atenção, alerta e inundação.

Em cada cenário da calibração são estimados os parâmetros do modelo empírico, e cujo número varia de acordo com o número de estações de montante utilizadas. O procedimento inicia com a geração das previsões, e posteriormente, é calculada a soma do erro quadrático entre os níveis previstos e observados, na discretização do horizonte da estação, iniciando no momento da primeira previsão realizada com os dados acima do limiar do cenário. A soma do erro quadrático foi escolhida como métrica de função-objetivo de acordo com os resultados encontrados no trabalho de Oliveira et al., 2025. Um método de otimização foi utilizado para encontrar o conjunto de parâmetros que minimize a soma do erro quadrático.

A otimização dos parâmetros foi testada utilizando diferentes métodos, disponíveis através de bibliotecas dentro da linguagem de programação python, entre eles: *Differential Evolution*, *Dual Annealing*, *Direct* e L-BFGS-B. Os três primeiros são de busca global e com custo computacional mais alto em relação ao último método, que é de busca local, com custo computacional baixo e rápido. Todos os métodos apresentaram o mesmo resultado, variando no tempo de processamento. Dessa forma, observou-se que as funções otimizadas apresentam um ótimo global bem definido, com evidência de que a função-objetivo se comporta de forma aproximadamente unimodal na região relevante do espaço de busca. A partir dessa análise utilizou-se o método "L-BFGS-B" buscando por rapidez e baixo custo computacional.

O método L-BFGS-B é uma variação do algoritmo L-BFGS (*Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno*), desenvolvida para lidar com restrições de limites (*bounds*) nas variáveis de decisão. Trata-se de um método quasi-Newton de segunda ordem que não utiliza explicitamente a matriz Hessiana da função objetivo, mas constrói, a cada iteração, uma aproximação da inversa da Hessiana a partir das variações sucessivas do gradiente. Com base nessa aproximação, o método define um modelo quadrático local da função objetivo e determina a direção de busca. O processo é repetido até que critérios de convergência sejam atendidos (Byrd et al., 1995; Nocedal e Wright, 2006). Neste trabalho, os limites das variáveis foram definidos no intervalo de −0,99 a 0,99, evitando coeficientes irreais.

Na validação, o início dos eventos é determinado como a primeira vez em que o valor observado ultrapassa a cota de alerta, (seguindo o método usado operacionalmente pelo SGB). Dessa forma, a primeira previsão gerada ocorre na primeira vez em que o valor observado ultrapassa a cota de alerta. Para gerar a primeira previsão são usados dados anteriores ao início do evento, correspondendo a um período de duas vezes o valor do horizonte de previsão. São validados somente os eventos que não apresentem falhas em nenhuma das estações, com

tamanho mínimo de duas vezes o horizonte mais 2, e usando um gap de 3 dias como diferença máxima admitida entre dois eventos consecutivos.

Como resultado desta etapa da pesquisa foram geradas equações que compõem os modelos empíricos para a bacia do rio Taquari, Caí, Uruguai, Sinos e Jacuí, apresentados no próximo capítulo. Os resultados obtidos com os modelos empíricos foram comparados com os dados observados e com os resultados brutos dos modelos do SACE, cujas equações foram calibradas anteriores à 2024 e fornecidas diretamente pelo SGB no contexto do projeto de aprimoramento do Sistema de Alerta do Rio Grande do Sul Hidrológico. As previsões brutas obtidas com os modelos do SACE serão chamadas nesse trabalho de benchmark, com o objetivo de representar resultados de previsões que podem ser classificadas como referência para modelos empíricos. A análise das previsões contou com as seguintes métricas de desempenho: deslocamento de pico, diferença de pico, EMA, EMA até o pico, EMR, EMR até o pico, cujas descrições são apresentadas no subcapítulo 3.3.

Esta etapa da pesquisa buscou responder a seguinte pergunta: Os modelos empíricos desenvolvidos nesse trabalho apresentam desempenho similar aos do benchmark?

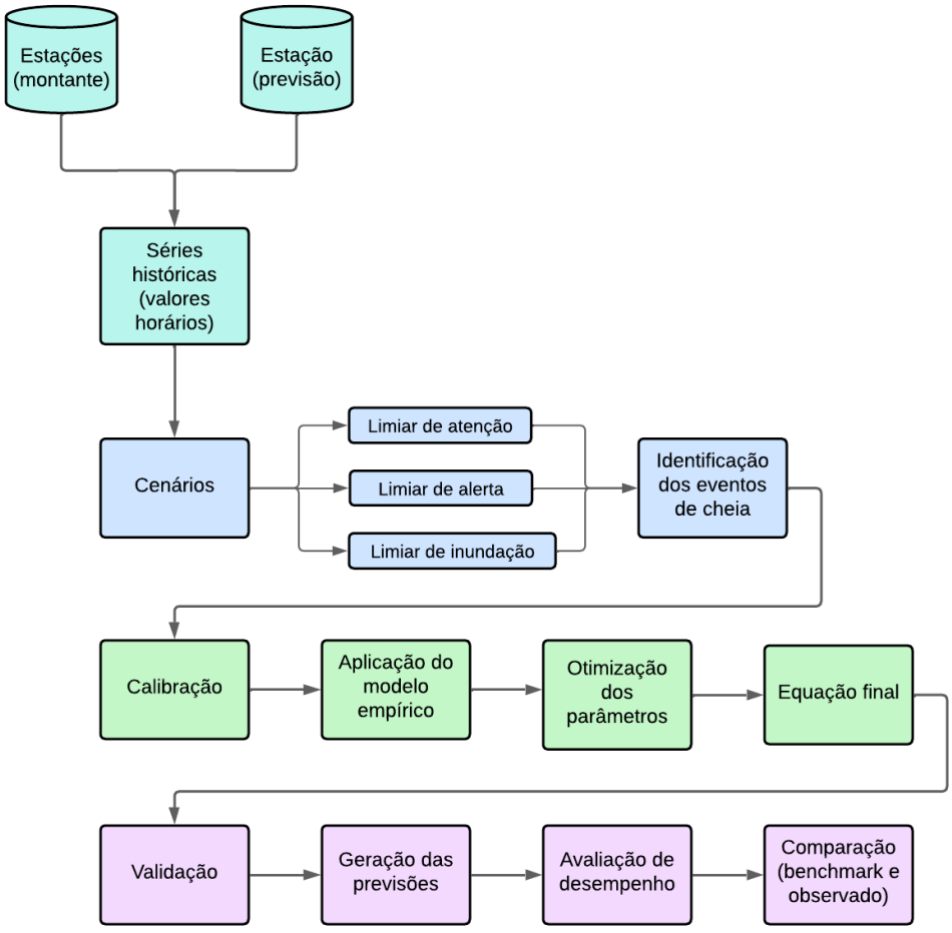

Figura 3.8. Fluxograma da concepção do modelo de diferenças.

3.2.1.1 Bacia do Rio Taquari

No SAH da bacia do Rio Taquari são usados como dados de entrada nos modelos empíricos informações das estações Muçum (86510000), Linha José Júlio (86472000), Encantado (86720000) e Estrela (86879300), gerando previsões para as cidades de Muçum, Encantado e Estrela (Buffon et al., 2021). Além das cidades presentes no SAH, a cidade de Taquari foi incluída como mais um ponto de previsão, usando dados da própria estação Taquari (86950000), Porto Mariante (8689500) e Estrela (86879300). Para a estação de Taquari, o horizonte de previsão foi determinado por meio da análise da autocorrelação temporal. Foram avaliadas defasagens sucessivas da série observada, identificando-se a maior defasagem em que a correlação linear com a série original permanecia elevada, igual a 0,99, resultando em um horizonte de 6h.

A Tabela 3.1 apresenta informações sobre as estações com previsões de níveis, mostrando suas coordenadas de localização (latitude e longitude), data de início de operação, antecedência das previsões geradas (de acordo com os horizontes do SACE) e estações usadas na previsão. A Figura 3.9 mostra a localização espacial das estações ao longo do rio Taquari.

Tabela 3.1. Informações das estações usadas para gerar previsões na bacia do rio Taquari.

Estações de previsão	**Lat.**	**Long.**	**Área de drenagem (Km²)**	**Início de operação**	**Horizonte (h)**	**Estações usadas**	**Cota de alerta (m)**
Muçum	-29,167	-51,867	16.000	30/04/2018	4	86510000, 86472000	9
Encantado	-29.235	-51,855	19.100	03/06/2009	4	86720000, 86510000, 86472000	9
Estrela	-29,473	-51,963	22.472	25/11/2020	6	86879300, 86720000, 86510000,	17
Taquari	-29,807	-51,876	25.900	26/11/2021	6	86879300, 86895000, 86950000	6,5

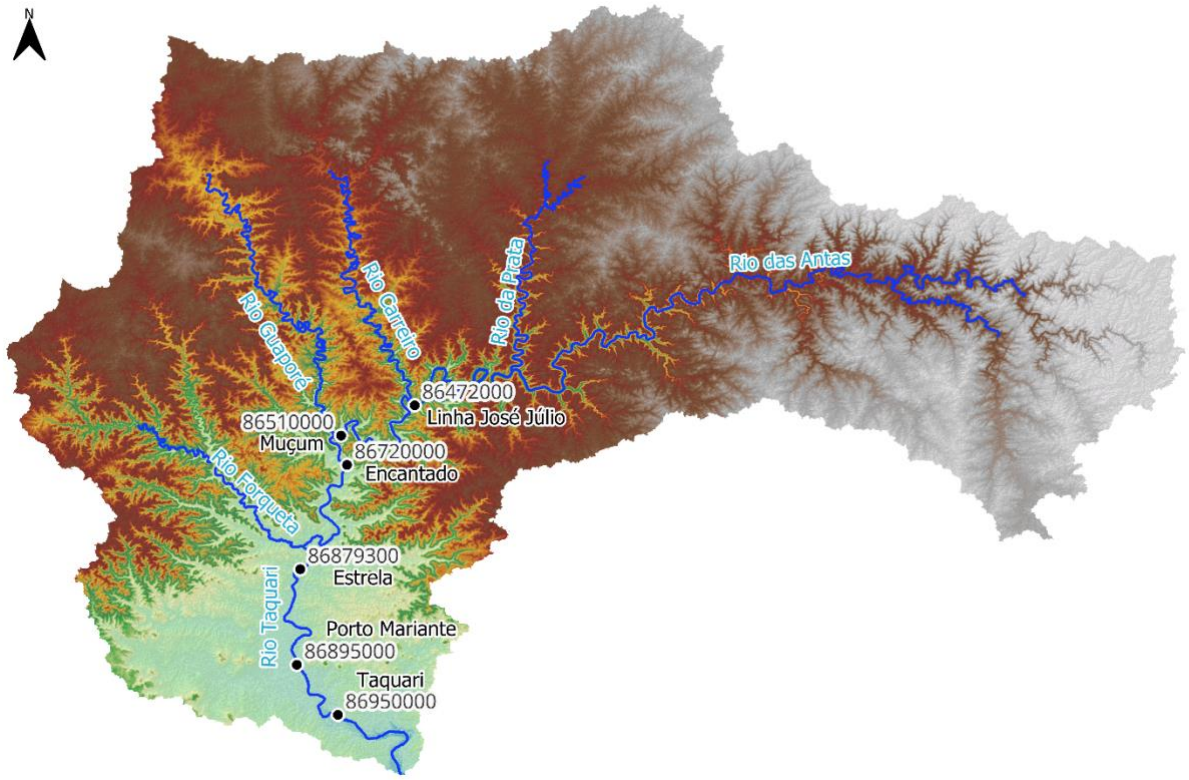

Figura 3.9. Estações usadas na aplicação do modelo de diferenças na bacia do rio Taquari.

3.2.1.2 Bacia do Rio Caí

No SAH da bacia do Rio Caí são usados como dados de entrada nos modelos empíricos informações das estações Barca do Caí (87170000), Passo Montenegro (87270000), São Vendelino (87168000) e Nova Palmira (87160000), gerando previsões para as cidades de São Sebastião do Caí, Capela de Santana e Montenegro. A Tabela 3.2 apresenta informações sobre as estações com previsões de níveis, mostrando suas coordenadas de localização (latitude e longitude), data de início de operação, antecedência das previsões geradas (de acordo com os horizontes do SACE) e estações usadas na previsão. A Figura 3.10 mostra a localização espacial das estações ao longo do rio Caí.

Tabela 3.2. Informações das estações usadas para gerar previsões na bacia do rio Caí.

Estações de previsão	Lat.	Long.	Área de drenagem (Km²)	Início de operação	Horizonte (h)	Estações usadas	Cota de alerta (m)
Barca do Caí	-29,59	-51,383	3.030	05/04/2018	10	87170000, 87168000, 87160000	7
Passo Montenegro	-29,701	-51,441	4.360	01/09/2014	10	87270000, 87170000, 87160000	4

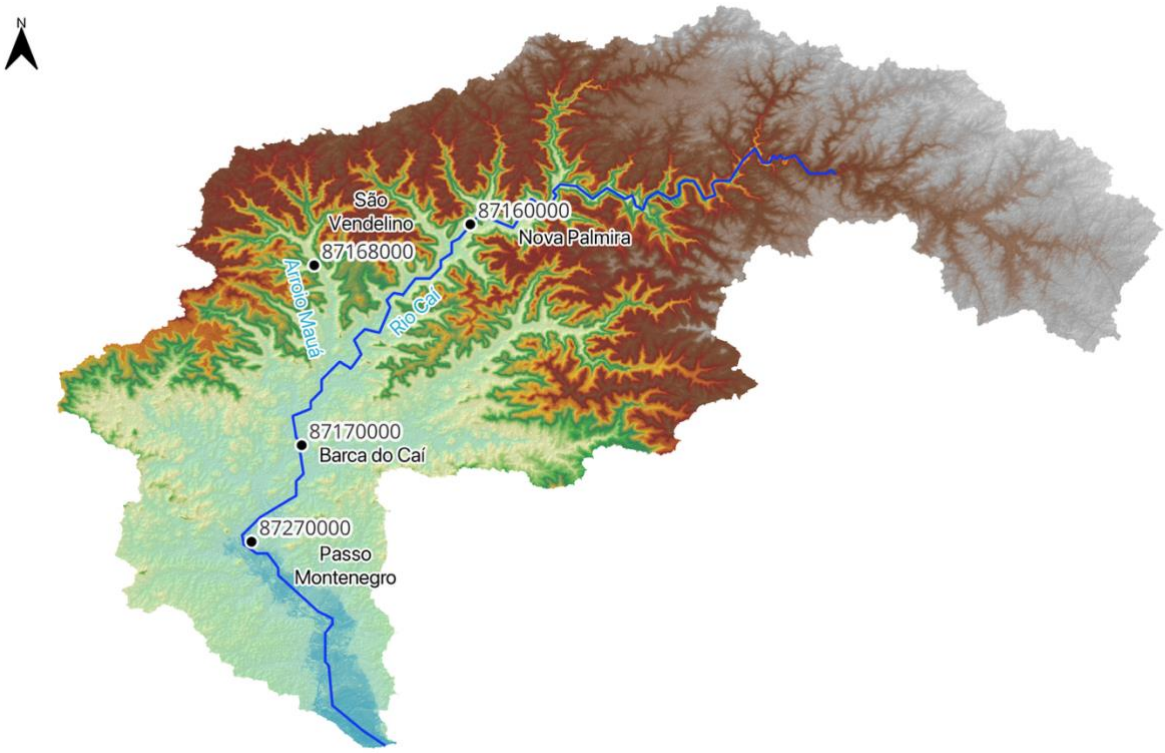

Figura 3.10. Estações usadas na aplicação do modelo de diferenças na bacia do rio Caí.

3.2.1.3 Bacia do Rio Uruguai

No SAH da bacia do Rio Uruguai são usados como dados de entrada nos modelos empíricos informações das estações Alegrete (76750000), Manoel Viana (76560000), Rosário do Sul (76310000), Itaqui (75900000), Uruguaiana (77150000), Passo São Borja (75780000) e Garruchos (75550000). As previsões são geradas para as cidades de Alegrete, Manoel Viana, Rosário do Sul, Itaqui, Uruguaiana e São Borja. A Tabela 3.3 apresenta informações sobre as estações com previsões de níveis, mostrando suas coordenadas de localização (latitude e longitude), data de início de operação, antecedência das previsões geradas (de acordo com os horizontes do SACE) e estações usadas na previsão. A Figura 3.11 mostra a localização espacial das estações ao longo do rio Uruguai.

Tabela 3.3. Informações das estações usadas para gerar previsões na bacia do rio Uruguai.

Estações de previsão	Lat.	Long.	Área de drenagem (Km²)	Início de operação	Horizonte (h)	Estações usadas	Cota de alerta (m)
Alegrete	-29,768	-55,788	5.867	29/09/2005	4	76750000	8,5
Manoel Viana	-29,596	-55,481	29.400	29/09/2005	6	76560000	8,6
Rosário do Sul	-30,243	-54,917	12.100	29/09/2005	4	76310000	5,7
Itaqui	-29,118	-56,554	42.500	04/09/2011	15	75780000, 75900000	7,3
Uruguaiana	-29,749	-57,089	190.000	04/07/2005	17	75900000, 77150000	7,5
Passo São Borja	-28,624	-56,037	125.000	19/08/2007	10	75780000, 75550000	8

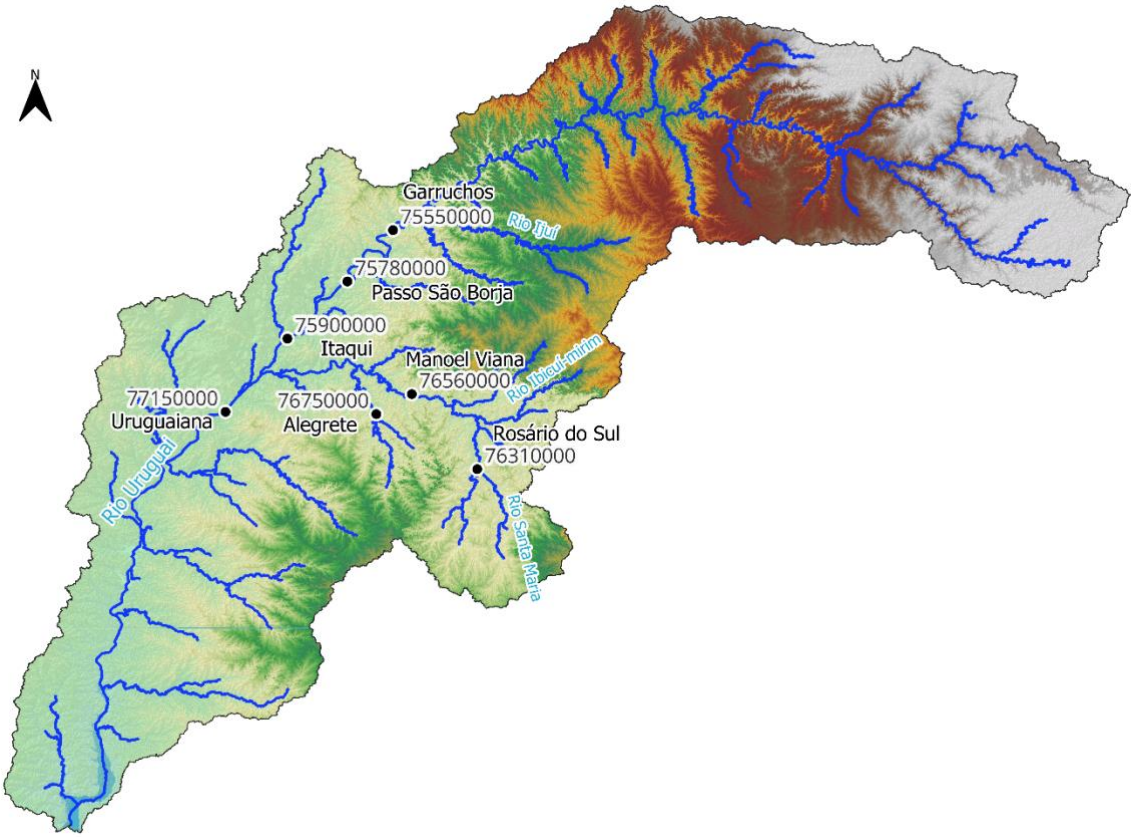

Figura 3.11. Estações usadas na aplicação do modelo de diferenças na bacia do rio Uruguai.

3.2.1.4 Bacia do Rio Jacuí

Na bacia do Rio Jacuí são usados como dados de entrada nos modelos empíricos informações da estação rio Pardo (85900000) atendendo ao município de mesmo nome da estação, localizado no rio Jacuí. O horizonte de previsão foi determinado por meio da análise da autocorrelação temporal. Foram avaliadas defasagens sucessivas da série observada,

identificando-se a maior defasagem em que a correlação linear com a série original permanecia elevada, igual a 0,99, resultando em um horizonte de 24h. A Tabela 3.4 apresenta informações sobre a estação com previsões de níveis, mostrando suas coordenadas de localização (latitude e longitude), data de início de operação, antecedência das previsões geradas e estações usadas na previsão. A Figura 3.12 mostra a localização espacial da estação.

Tabela 3.4. Informações da estação usada para gerar previsões na bacia do rio Jacuí.

Estações de previsão	Lat.	Long.	Início de operação	Horizonte (h)	Estações usadas	Cota de alerta (m)
Rio Pardo	-29,995	-52,376	06/11/2017	24	85900000	10

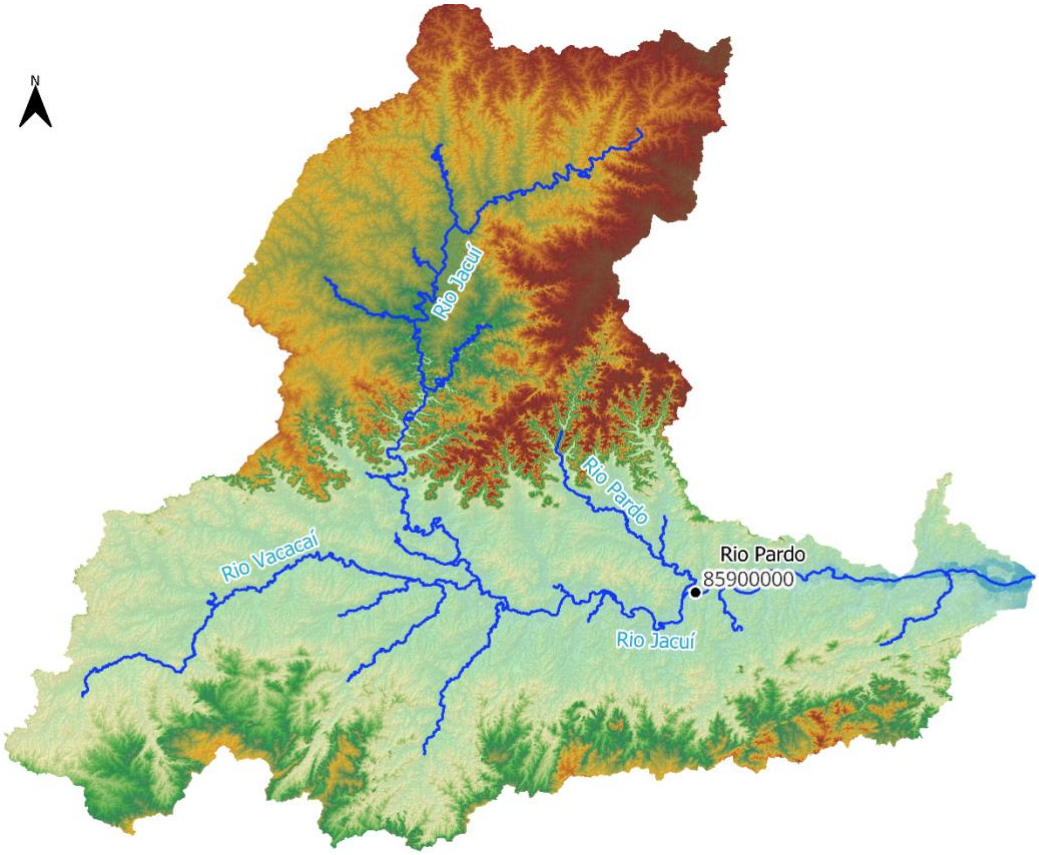

Figura 3.12. Estação usada na aplicação do modelo de diferenças na bacia do rio Jacuí.

3.2.1.5 Bacia do Rio dos Sinos

Na bacia do Rio dos Sinos são usados como dados de entrada nos modelos empíricos informações das estações Campo Bom (87380000) e São Leopoldo (87382000), gerando previsões para o município de São Leopoldo. O horizonte de previsão foi determinado por meio da análise da autocorrelação temporal. Foram avaliadas defasagens sucessivas da série

observada, identificando-se a maior defasagem em que a correlação linear com a série original permanecia elevada, igual a 0,99, resultando em um horizonte de 12h. A Tabela 3.5 apresenta informações sobre as estações com previsões de níveis, mostrando suas coordenadas de localização (latitude e longitude), data de início de operação, antecedência das previsões geradas e estações usadas na previsão. A Figura 3.13 mostra a localização espacial da estação.

Tabela 3.5. Informações das estações usadas para gerar previsões na bacia do rio dos Sinos.

Estações de previsão	Lat.	Long.	Início de operação	Horizonte (h)	Estações usadas	Cota de alerta (m)
São Leopoldo	-29,759	-51,148	01/08/2018	12	87380000, 87382000	4

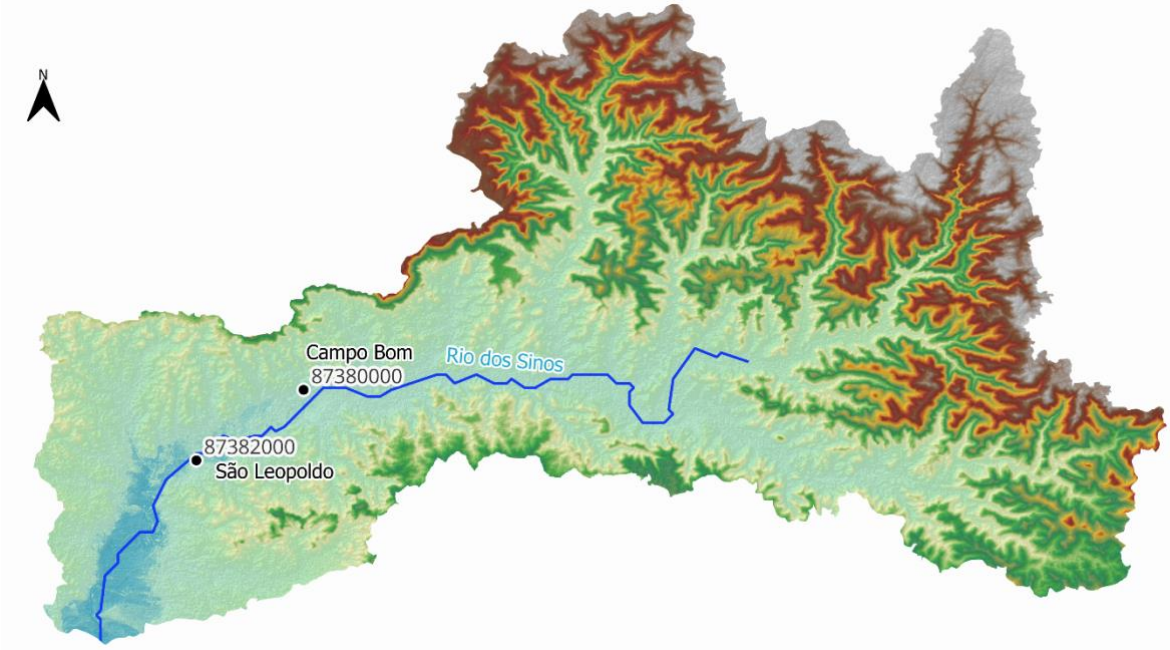

Figura 3.13. Estações usadas na aplicação do modelo de diferenças na bacia do rio dos Sinos.

3.2.2 Comparação das previsões de curto prazo do modelo empírico com as previsões emitidas usando o modelo MGB

Esse capítulo tem como objetivo avaliar e comparar os resultados emitidos pelos modelos empíricos e pelo modelo MGB previsão nos eventos de cheia que ocorreram em 2023 nos meses de setembro e novembro, em 2024 nos meses de abril e maio e em 2025 nos meses de junho e julho.

Para realizar previsões de eventos passados (*hindcasts*) com o modelo MGB, foi incorporada aos dados de entrada a precipitação prevista retrospectiva. Para isso, utilizaram-se previsões provenientes do modelo geral de circulação atmosférica do ECMWF (*European*

Centre for Medium-Range Weather Forecasts) (Molteni et al., 1996). Elas foram obtidas no repositório TIGGE (*THORPEX Interactive Grand Global Ensemble*) (Thielen et al., 2009; Bougeault et al., 2010) que engloba previsões numéricas de curto e médio prazo de centros globais. Foram usadas as previsões determinísticas, utilizando o membro controle, que busca representar uma trajetória central plausível da previsão (Swinbank et al., 2016; Leutbecher & Palmer, 2008).

As previsões foram obtidas para a variável de precipitação total, usando as rodadas diárias das 00 UTC. O horizonte das previsões foi de 360 horas (15 dias), com resolução temporal de 6 horas, resultando em acumulados de precipitação por intervalo de 6h e resolução espacial de 0,5°. Os horários das previsões de chuva foram adaptados para o Brasil, gerando previsões de níveis cuja inicialização ocorre às 21h do dia anterior ao dia informado no 00 UTC, e a primeira hora de previsão corresponde às 22h.

Definidas as previsões de precipitação, foi necessário estabelecer as condições iniciais consistentes para cada rodada de *hindcast*. Para isso, realizou-se inicialmente uma simulação de referência no MGB, abrangendo o período de 2018 a agosto de 2025, utilizando dados de chuva observados pelas estações hidrometeorológicas (IPH, 2025b). Essa etapa permitiu a obtenção dos estados internos do modelo, tais como a umidade do solo e os volumes armazenados na rede de drenagem, previamente à inserção da chuva prevista. As previsões do MGB foram inicializadas às 22h nos dias de validação dos modelos empíricos, utilizando a chuva prevista, e adotando um horizonte de 15 dias de previsão.

Na sequência, as previsões do MGB receberam ancoragem, ou correção de viés do instante inicial. A ancoragem consiste em determinar a diferença entre o valor da previsão e o valor observado (ou dado usado como benchmark) e propagar essa diferença ao longo do horizonte da previsão (Figura 3.14). Isso faz com que a previsão tenha valor igual ao observado no instante inicial, e que apresente um deslocamento no restante do seu horizonte, subindo ou descendo a série de dados. Essa técnica busca reduzir possíveis erros associados ao modelo hidrológico e aos dados de chuva prevista (Morawietz et al., 2011; Li et al., 2015). Nas previsões do MGB a ancoragem foi feita usando os dados observados nos pontos de validação dos modelos empíricos. A comparação entre o modelo MGB e os modelos empíricos foi realizada nos pontos de previsão utilizados na etapa de validação dos modelos empíricos, englobando os meses de setembro de 2023, novembro de 2023, abril de 2024 (a partir do dia 25), maio de 2024, junho de 2025 e julho de 2025.

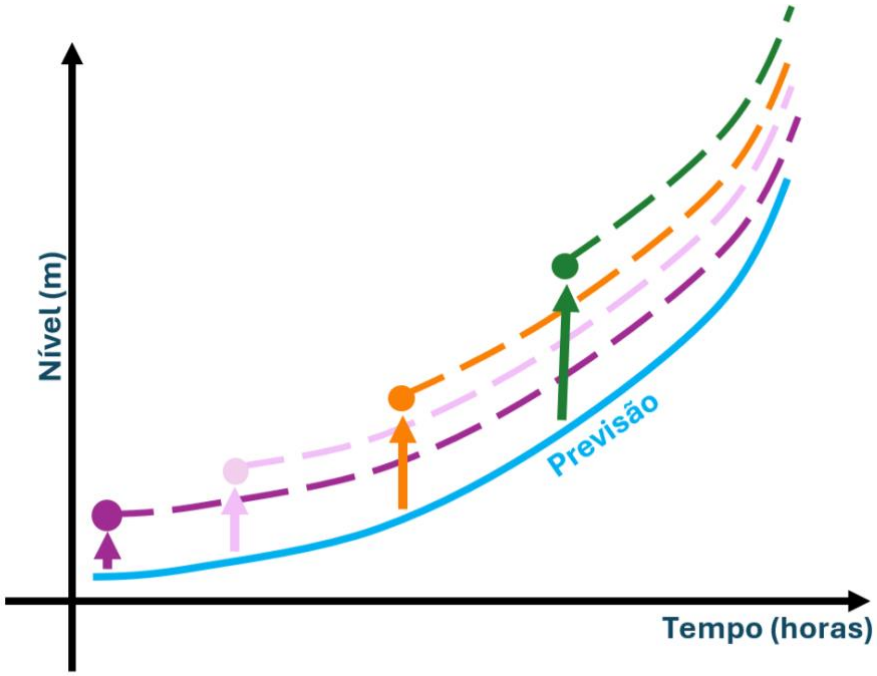

Figura 3.14. Exemplo de aplicação de ancoragem em uma previsão.

A Figura 3.15 mostra um exemplo de como as previsões do MGB foram utilizadas para a comparação com os modelos empíricos e com o benchmark, usando dados reais para a cidade de Encantado, na bacia do rio Taquari, durante o evento de cheia que ocorreu no mês de novembro de 2023. A primeira parte da figura mostra os resultados de várias previsões geradas com o modelo MGB em tons de azul, onde as previsões mais antigas são apresentadas em tons de azul mais claro (correspondente a previsão de um dia antes do início do evento), enquanto as previsões mais recentes estão com tons de azul mais forte. A parte dois mostra que foram utilizadas as previsões mais recentes do modelo MGB, correspondendo as primeiras 24 horas, antes da emissão da próxima previsão.

A Figura 3.16 mostra a parte 3, com um exemplo de acoplamento das previsões do MGB nos dados observados, nos pontos de validação dos modelos empíricos. Observa-se então que as previsões têm como ponto de partida os dados observados, e as flechas indicam o ponto final, usado para comparação com os modelos empíricos, correspondendo sempre ao ponto após a ancoragem. Muitas previsões não apresentam como ponto final (seta), exatamente o próximo valor observado, mostrando o viés do modelo. Na análise dos resultados foram selecionados sempre os resultados do MGB na previsão após a ancoragem. Por fim, a parte 4 mostra visualmente as primeiras 24 horas das previsões do MGB, juntamente com as flechas que indicam os pontos analisados.

Na análise das diferentes previsões foram aplicadas as seguintes métricas de desempenho: deslocamento de pico, diferença de pico, EMA, EMA até o pico, EMR, EMR até o pico. Esta etapa da pesquisa buscou responder a seguinte pergunta: Como é o desempenho dos modelos empíricos em comparação com as previsões de níveis do modelo MGB previsão?

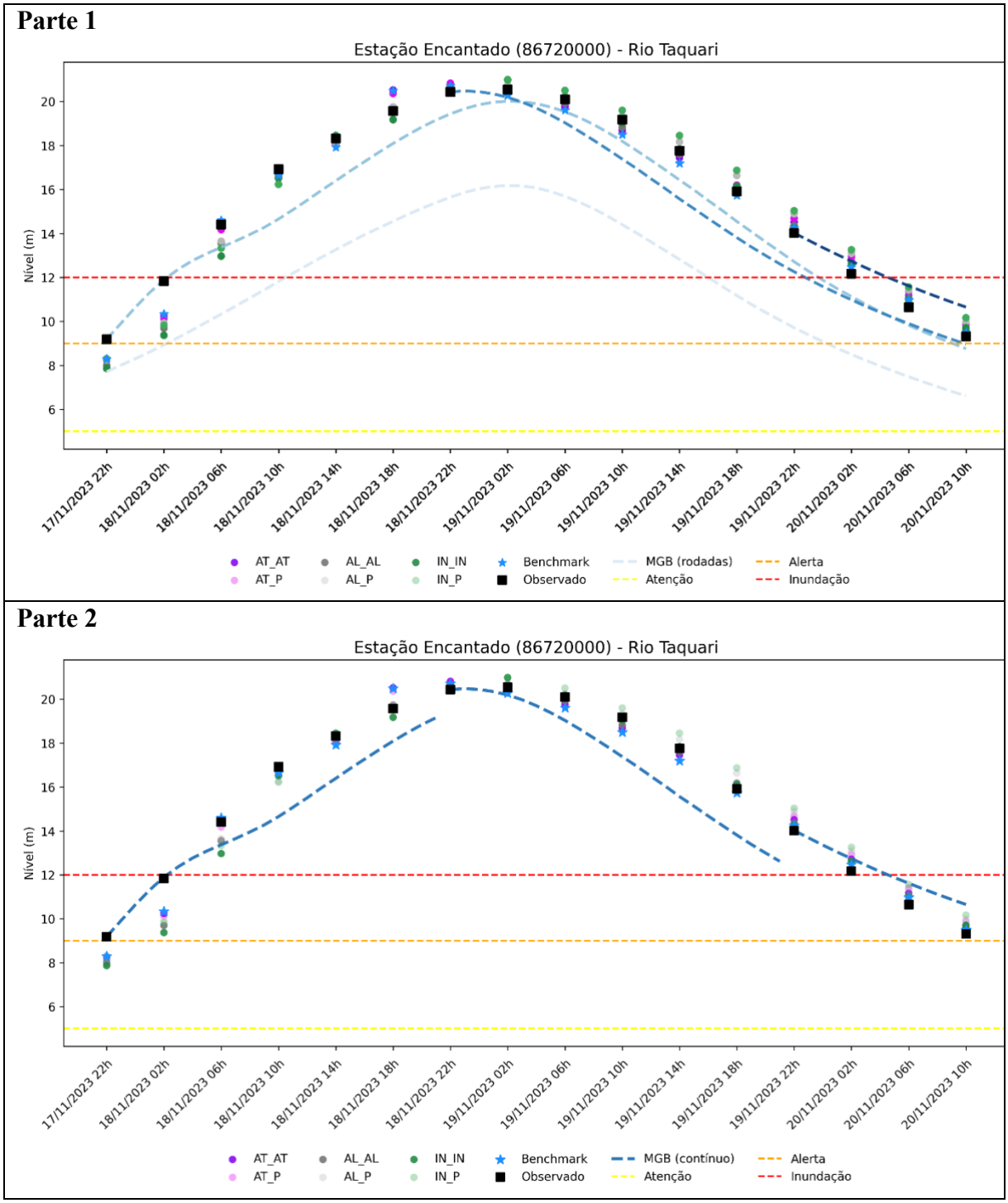

Figura 3.15. Previsões do MGB durante o evento de novembro de 2023 na estação Encantado (parte 1) e previsões do MGB selecionando somente as primeiras 24 horas de cada previsão diária (parte 2).

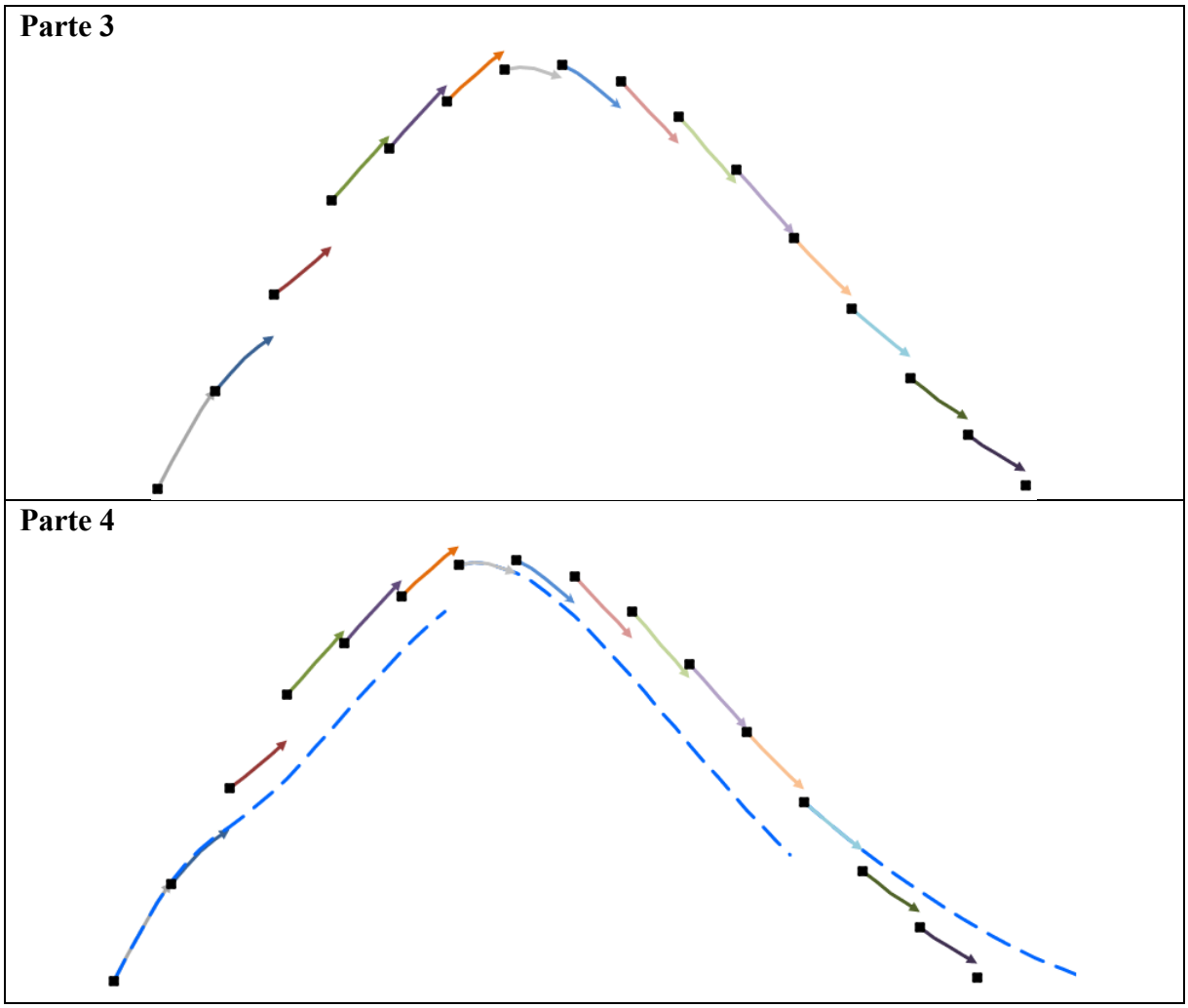

Figura 3.16. Setas que representam os pontos do MGB usados na comparação com os modelos empíricos (parte 3) e exemplo visual das diferentes previsões (parte 4), durante o evento de novembro de 2023 na estação Encantado.

3.2.3 Acoplamento de resultados dos modelos de curto prazo com previsões de médio prazo obtidas com o modelo MGB.

Com os resultados do modelo MGB previsão, podem ser gerados boletins com informações sobre o nível futuro dos rios, em uma escala de até 15 dias. Uma das formas de realizar o pós-processamento dos níveis gerados pelo MGB é acoplando no primeiro horário de previsão os resultados obtidos com a aplicação dos modelos empíricos. Ao longo do dia pode-se realizar também o ajuste da previsão diária do MGB, incluindo os resultados das previsões dos modelos empíricos, que são gerados ao longo do dia. A união dessas informações resulta em uma previsão cujas primeiras horas do horizonte proporciona maior precisão em informar

qual será o nível atingido (oriundo dos modelos empíricos), e, além disso, agrega informações sobre como será o comportamento dos rios para os próximos 15 dias (oriundo do modelo MGB).

A vantagem em acoplar as previsões é que elas usadas de forma separada não agregam tantos benefícios. Isso porque o modelo de diferenças tende a apresentar menos erros, porém o seu horizonte de previsão é limitado, quando existem dados disponíveis. Já o modelo MGB gera previsões para um horizonte maior, porém pode agregar mais erros na geração dos níveis nas próximas horas devido a erros que se somam além dos dados de entrada, como os erros do próprio modelo hidrológico.

O método aplicado para realizar o acoplamento partiu da análise da utilização de diferentes pontos de partida como fonte para a ancoragem do modelo MGB. Foram testados três pontos de partida: ancoragem às 22h, ancoragem nos dados observados nos pontos de previsão dos modelos empíricos e ancoragem nos pontos de previsão usando o cenário AT_AT dos modelos empíricos. A Figura 3.17 exemplifica as possibilidades de ancoragem da previsão do MGB. Além desses pontos de partida também foi avaliado o MGB sem nenhum tipo de ancoragem, chamado de MGB puro. Os resultados foram organizados por antecedência (Figura 3.18), avaliando o horizonte de até 120 horas (correspondendo a 5 dias). Para avaliar os resultados gerados foram calculados o EMA e o EMR ao longo dos horizontes de previsão.

Esta etapa da pesquisa buscou responder a seguinte pergunta: Qual é o melhor ponto de partida para ancorar as previsões de médio prazo do modelo MGB previsão?

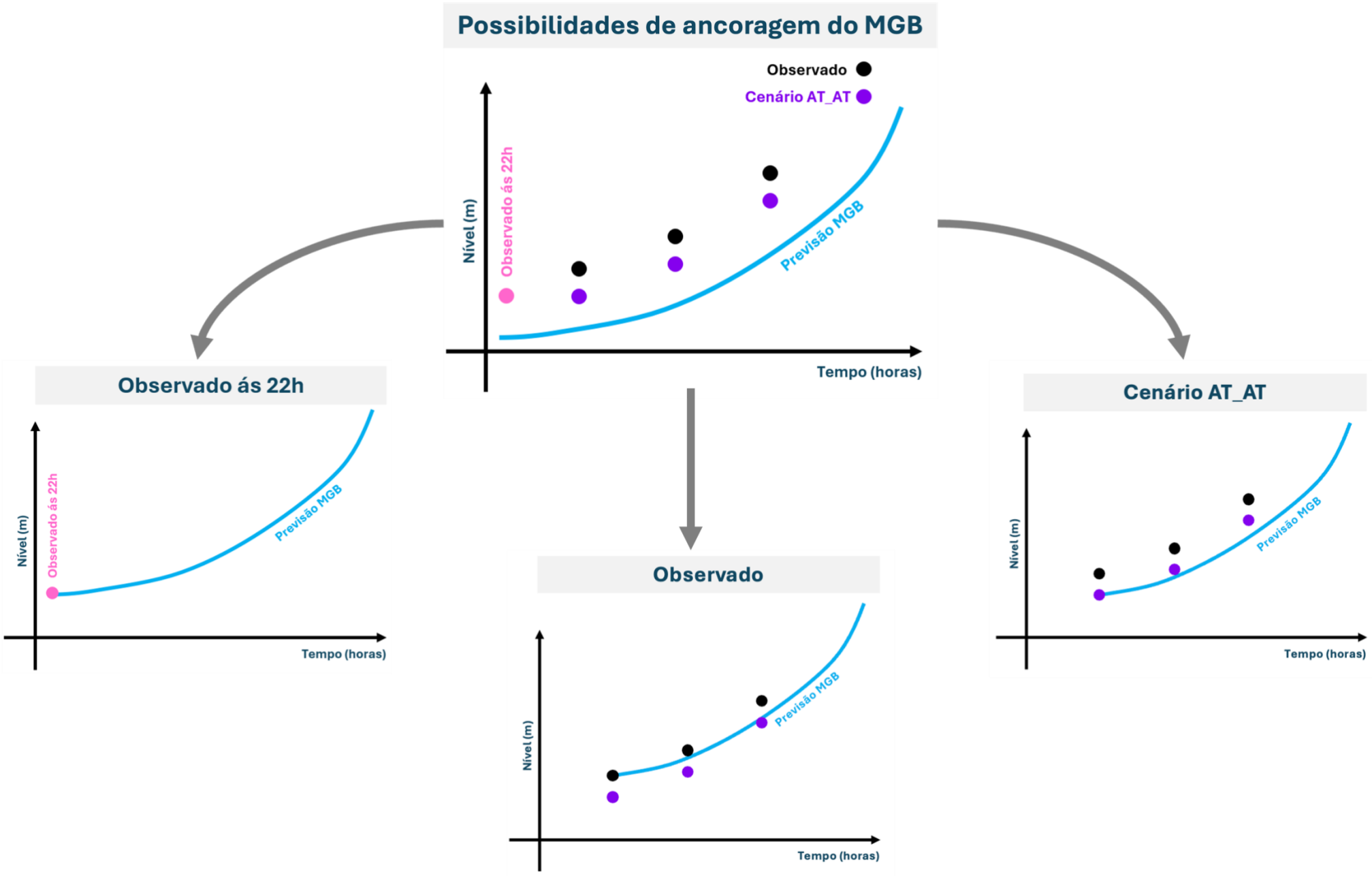

Figura 3.17. Possibilidades de acoplamento das previsões do MGB.

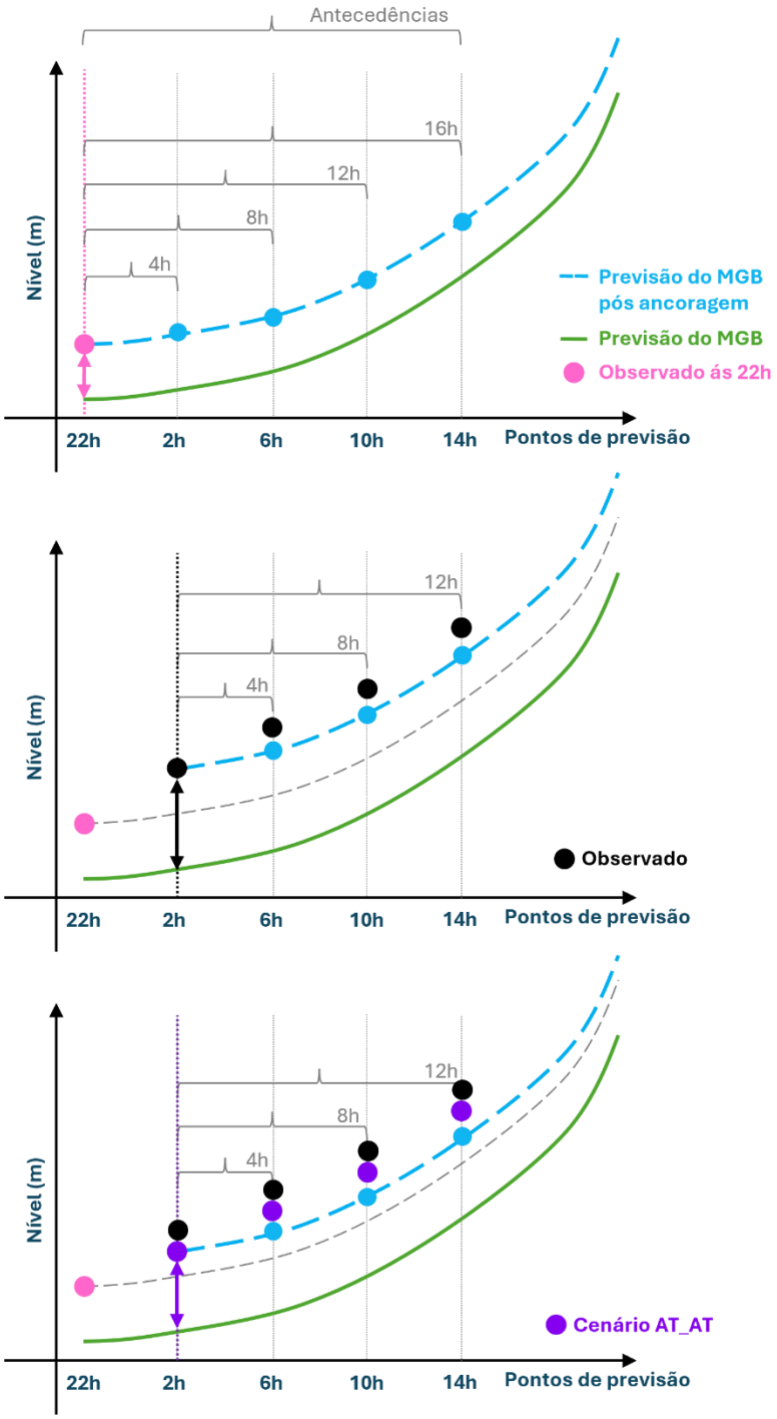

Figura 3.18. Exemplo de análise dos resultados por antecedência.

3.3 Métricas de verificação

Para avaliar as previsões geradas foram escolhidas métricas capazes de avaliar a acurácia, o erro associado e o ganho de desempenho das previsões. Para isso foram escolhidas as seguintes métricas: erro médio absoluto (EMA) e erro médio relativo (EMR), em todo o

evento e até o pico do evento, diferença de pico, deslocamento de pico e *Continuous Ranked Probability Score* (CRPS) médio. Cada uma das métricas será descrita a seguir.

O erro médio absoluto mede a acurácia da previsão, através das diferenças absolutas entre os valores observados e previstos. Quanto mais próximo de zero, melhor o resultado, que mostra que os valores previstos e observados estão muito próximos. Já o erro médio relativo conta com o absoluto das diferenças, portanto os erros positivos e negativos podem acabar se compensando, fazendo com que o resultado não apresente a real proporção do erro. A sua vantagem em relação ao EMA é que ele apresenta um viés geral da previsão, podendo indicar se ocorre uma tendência de superestimativa ou subestimativa das previsões (Fan, 2015). A seguir são apresentadas as equações do EMA e do EMR, cujos valores ótimos são zero.

$$EMA = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|Q_{c(i)} - Q_{o(i)}\right| \tag{3}$$

$$EMR = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_{c(i)} - Q_{o(i)}}{\sum_{i=1}^{n} Q_{o(i)}} * 100 \tag{4}$$

Em que: Q_c corresponde as previsões calculadas, Q_o aos dados observados.

O EMR e o EMA foram avaliados de duas formas, considerando todo o evento e considerando somente a região de subida do hidrograma, indo até o pico do evento. Dessa forma foi possível analisar como os erros distribuem-se focando na região mais crítica de um evento de cheia (até a ocorrência do pico), além de analisar os erros durante todo o evento (nas regiões de subida e descida dos eventos).

A diferença de pico representa o quanto o valor previsto máximo se aproximou ou se distanciou do valor máximo observado, calculada como a diferença entre o valor máximo da série observada, menos o valor máximo da série prevista. Diferenças de pico positivas indicam que a previsões subestimou o pico, enquanto valores negativos indicam que a previsões superestimou o valor do pico (Figura 3.19). Já o deslocamento de pico informa se a previsão adiantou o atrasou temporalmente o pico da série observada. Deslocamentos de pico positivos ocorrem quando as previsões atrasam a ocorrência do pico, enquanto deslocamentos negativos ocorrem quando a previsão adianta o pico (Figura 3.19).

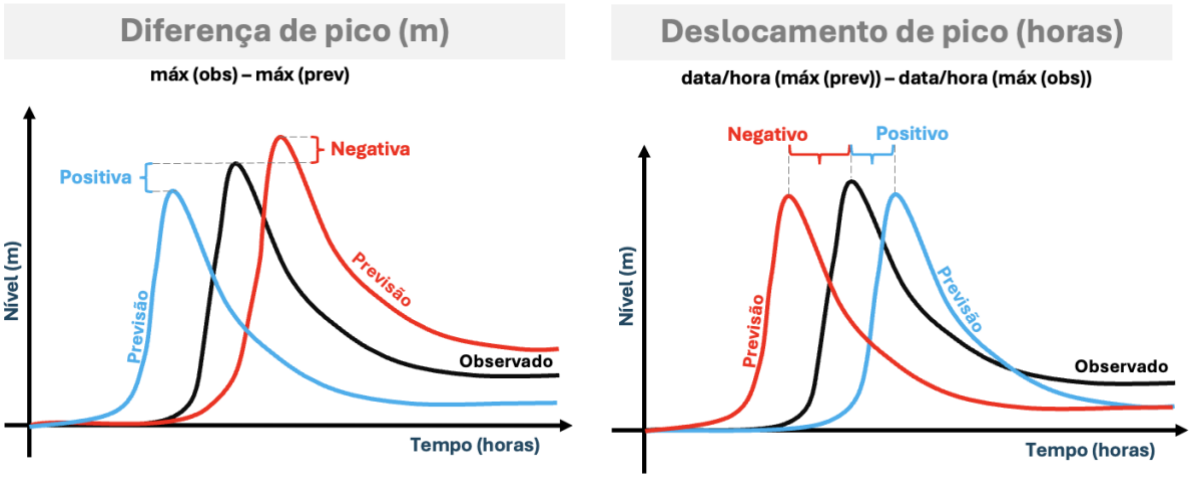

Figura 3.19. Exemplo de cálculo das métricas de diferença de pico e deslocamento de pico.

As previsões geradas a partir dos diferentes cenários podem ser vistas como um conjunto de previsões probabilísticas, chamadas de *ensemble*. Para avaliar o ganho de desempenho ao utilizar as previsões em forma de *ensemble*, foi aplicada a métrica *Mean Contionuous Ranked Probability Score* (CRPS médio), que mede a acurácia de previsões probabilísticas contínuas, sendo largamente utilizada na literatura (Pappenberger, 2015). Ela é calculada a partir da integral do quadrado da diferença entre a função de distribuição acumulada da previsão e a função degrau associada ao valor observado. As equações a seguir apresentam o CRPS e o CRPS médio, cujos valores ótimos são zero.

$$CRPS_k = \int_{-\infty}^{+\infty} [F_k(x) - O_k(x)]^2 \, dx \tag{5}$$

$$\overline{CRPS} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{n} CRPS_k \tag{6}$$

Em que: F_k é a CDF da previsão e O_k é a representação da função de passo unitário da observação.

No caso de previsões determinísticas, já que existe somente um resultado por previsão, o CRPS acaba representando o EMA da previsão, possibilitando comparar previsões probabilísticas com previsões determinísticas (Fan, 2015; WMO, 2025). Em seguida, a Figura

3.20 mostra a exemplificação da aplicação do CRPS médio em previsões probabilísticas e determinísticas:

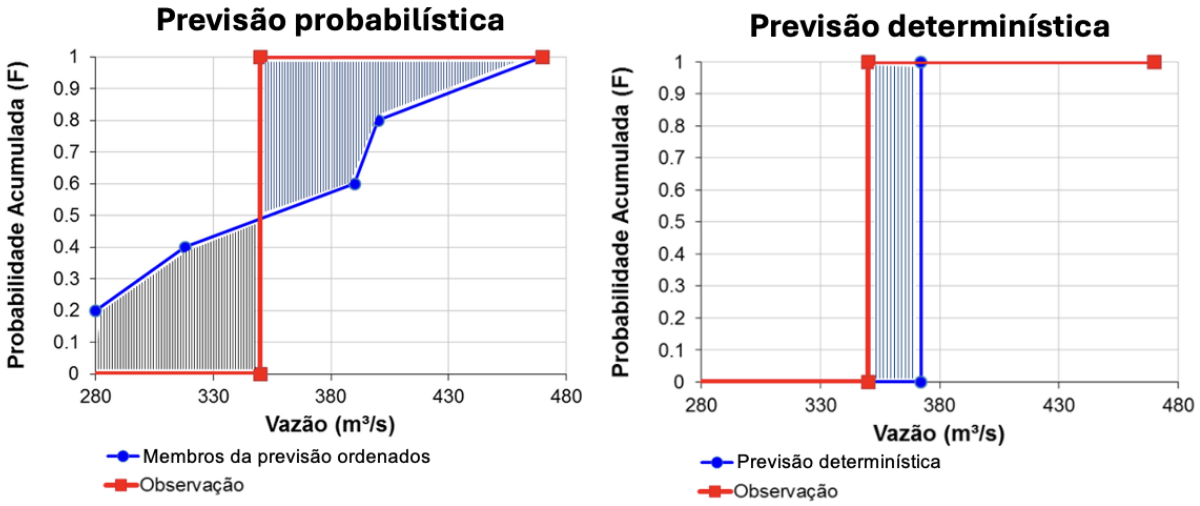

Figura 3.20. Representação das curvas de probabilidade acumuladas das previsões probabilísticas (primeiro gráfico) e determinísticas (segundo gráfico). Fonte: adaptado de Fan (2015).

4. RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos pela pesquisa, iniciando com a concepção dos modelos empíricos, e as análises individual e em conjunto das bacias da área de estudo. Na sequência são comparados os resultados do MGB com os resultados dos modelos empíricos, e, por fim, é apresentada uma análise de acoplamento dos resultados de curto prazo dos modelos empíricos com as previsões de médio prazo do modelo MGB.

4.1 Modelos empíricos

A seguir são apresentadas as previsões de níveis para as estações de cada bacia hidrográfica nos eventos de setembro de 2023, novembro de 2023, abril e maio de 2024 e junho e julho de 2025. Para cada bacia os resultados iniciam com uma tabela contendo informações sobre a calibração dos modelos, em que, para cada um dos cenários, é informando o período de calibração, o número de eventos utilizados dentro do período da calibração e os coeficientes M1, M2, J e C, resultantes do processo de calibração e que posteriormente são usados para gerar as previsões na validação. Na sequência, a próxima tabela mostra os resultados das seguintes métricas aplicadas nas previsões usadas para validação: EMA, EMA até o pico, EMR, EMR até o pico, diferença de pico e deslocamento de pico.

Seguindo os resultados, estão gráficos com as previsões realizadas em cada bacia, seguida por uma figura com os resultados das métricas usadas para avaliar as previsões em formato de *boxplot*. O número de previsões realizadas em cada evento variou de acordo com a disponibilidade de dados de cada estação de previsão utilizada nos modelos empíricos. Para as estações onde existe SAH os resultados dos modelos brutos do SGB são referidos como benchmark, representados nos gráficos com a cor azul clara.

Quando não existem informações sobre a quantidade de eventos utilizada na calibração significa que, naquele momento, a estação ainda não havia ultrapassado o limiar referente. Quando não existem informações referentes aos coeficientes M1 ou M2 significa que a estação não utiliza essas estações no modelo empírico. Consequentemente, nesses casos os coeficientes utilizados correspondem a 0,1, e foram mantidos buscando representar o desempenho do modelo em situações de condições adversas as ideais.

4.1.1 Bacia do rio Taquari

Na bacia do rio Taquari o evento de setembro de 2023 não foi registrado de maneira contínua por nenhuma estação, ficando de fora do processo de validação (Tabela 4.1). A Tabela 4.2 e a Tabela 4.3 mostram os resultados das métricas por evento, a Figura 4.1 a Figura 4.4 mostram os gráficos das previsões e a Figura 4.5 mostra os *boxplots* com os resultados das métricas para toda a bacia.

De maneira geral, observou-se que as previsões dos diferentes cenários permaneceram próximas aos dados observados. A fase inicial de subida do hidrograma não foi bem representada em alguns casos, possivelmente em função das maiores variações de nível nesse período, exigindo um tempo de adaptação dos modelos empíricos. A estação Estrela (86879300) apresentou as maiores dispersões entre os cenários, resultando em uma banda de previsões mais ampla, o que contribuiu para uma melhor representação dos valores observados em algumas previsões.

A avaliação por métricas indicou que os cenários calibrados e avaliados entre limiares apresentaram menores valores de EMA quando comparados aos cenários avaliados até o pico. No entanto, ao considerar o EMA até o pico, os resultados mostraram-se mais equilibrados entre os cenários. Observou-se ainda que os cenários entre limiares apresentaram, em média, viés negativo (subestimação), enquanto os cenários até o pico tenderam à superestimação.

No EMR até o pico, as medianas dos cenários de mesmo limiar apresentaram valores semelhantes, com maior dispersão nos cenários avaliados até o pico. Em relação ao deslocamento do pico, a mediana igual a zero em todos os cenários indica que, na maioria dos casos, o instante do pico previsto coincidiu com o observado. Por fim, a diferença de pico apresentou medianas próximas de zero e comportamento semelhante entre os cenários, indicando boa representação da magnitude máxima dos eventos.

Tabela 4.1. Informações sobre a calibração dos modelos empíricos da bacia do rio Taquari.

Código	Nome	Evento	Cenário	Início	Fim	Nº de eventos	M1	M2	J	C
86510000	Muçum	Novembro/2023	AT_AT	20/05/2018 13h	16/11/2023 18h	31	0,88	-	-0,06	-0,04
86510000	Muçum	Novembro/2023	AL_AL	26/07/2018 23h	16/11/2023 18h	11	0,61	-	0,08	-0,21
86510000	Muçum	Novembro/2023	IN_IN	08/07/2020 04h	16/11/2023 18h	2	0,76	-	0,03	-0,11
86510000	Muçum	Novembro/2023	AT_P	20/05/2018 13h	16/11/2023 18h	34	0,86	-	-0,11	0,07
86510000	Muçum	Novembro/2023	AL_P	26/07/2018 23h	16/11/2023 18h	12	0,44	-	0,15	0,05
86510000	Muçum	Novembro/2023	IN_P	08/07/2020 04h	16/11/2023 18h	2	0,60	-	0,01	-0,02
86510000	Muçum	Abril e Maio/2024	AT_AT	20/05/2018 13h	30/04/2024 15h	35	0,84	-	0,00	-0,04
86510000	Muçum	Abril e Maio/2024	AL_AL	26/07/2018 23h	30/04/2024 15h	12	0,63	-	0,13	-0,16
86510000	Muçum	Abril e Maio/2024	IN_IN	08/07/2020 04h	30/04/2024 15h	3	0,46	-	0,36	-0,29
86510000	Muçum	Abril e Maio/2024	AT_P	20/05/2018 13h	30/04/2024 15h	38	0,82	-	-0,07	0,08
86510000	Muçum	Abril e Maio/2024	AL_P	26/07/2018 23h	30/04/2024 15h	13	0,57	-	0,07	0,16
86510000	Muçum	Abril e Maio/2024	IN_P	08/07/2020 04h	30/04/2024 15h	3	0,46	-	0,20	-0,08
86510000	Muçum	Junho e Julho/2025	AT_AT	20/05/2018 13h	23/06/2025 05h	38	0,86	-	-0,14	-0,04
86510000	Muçum	Junho e Julho/2025	AL_AL	26/07/2018 23h	23/06/2025 05h	14	0,72	-	0,00	-0,12
86510000	Muçum	Junho e Julho/2025	IN_IN	08/07/2020 04h	23/06/2025 05h	4	0,54	-	0,19	-0,23
86510000	Muçum	Junho e Julho/2025	AT_P	20/05/2018 13h	23/06/2025 05h	41	0,91	-	-0,38	0,27
86510000	Muçum	Junho e Julho/2025	AL_P	26/07/2018 23h	23/06/2025 05h	15	0,75	-	-0,23	0,40
86510000	Muçum	Junho e Julho/2025	IN_P	08/07/2020 04h	23/06/2025 05h	4	0,48	-	0,01	0,13
86510000	Muçum	Junho e Julho/2025	AT_AT	20/05/2018 13h	28/06/2025 23h	38	0,86	-	-0,14	-0,04
86510000	Muçum	Junho e Julho/2025	AL_AL	26/07/2018 23h	28/06/2025 23h	14	0,71	-	0,01	-0,11
86510000	Muçum	Junho e Julho/2025	IN_IN	08/07/2020 04h	28/06/2025 23h	4	0,54	-	0,19	-0,23
86510000	Muçum	Junho e Julho/2025	AT_P	20/05/2018 13h	28/06/2025 23h	41	0,91	-	-0,38	0,27
86510000	Muçum	Junho e Julho/2025	AL_P	26/07/2018 23h	28/06/2025 23h	16	0,75	-	-0,23	0,40
86510000	Muçum	Junho e Julho/2025	IN_P	08/07/2020 04h	28/06/2025 23h	4	0,48	-	0,01	0,13
86720000	Encantado	Novembro/2023	AT_AT	13/06/2018 13h	17/11/2023 13h	22	0,58	0,20	0,01	-0,06
86720000	Encantado	Novembro/2023	AL_AL	03/10/2018 18h	17/11/2023 13h	8	0,30	0,66	-0,27	-0,19
86720000	Encantado	Novembro/2023	IN_IN	05/11/2019 09h	17/11/2023 13h	5	0,06	0,99	-0,42	-0,21
86720000	Encantado	Novembro/2023	AT_P	13/06/2018 13h	17/11/2023 13h	23	0,51	0,38	-0,19	0,02

Código	Nome	Evento	Cenário	Início	Fim	Nº de eventos	M1	M2	J	C
86720000	Encantado	Novembro/2023	AL_P	03/10/2018 18h	17/11/2023 13h	9	0,28	0,28	0,03	0,06
86720000	Encantado	Novembro/2023	IN_P	05/11/2019 09h	17/11/2023 13h	6	0,14	0,45	-0,07	0,16
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	AT_AT	13/06/2018 13h	17/06/2025 22h	25	0,56	0,14	0,11	-0,05
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	AL_AL	03/10/2018 18h	17/06/2025 22h	9	0,28	0,65	-0,20	-0,20
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	IN_IN	05/11/2019 09h	17/06/2025 22h	6	0,13	0,85	-0,31	-0,24
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	AT_P	13/06/2018 13h	17/06/2025 22h	26	0,53	0,19	0,00	0,04
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	AL_P	03/10/2018 18h	17/06/2025 22h	10	0,28	0,40	-0,02	-0,02
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	IN_P	05/11/2019 09h	17/06/2025 22h	7	0,14	0,53	-0,08	0,05
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	AT_AT	13/06/2018 13h	23/06/2025 10h	26	0,56	0,12	0,12	-0,06
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	AL_AL	03/10/2018 18h	23/06/2025 10h	10	0,31	0,58	-0,15	-0,18
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	IN_IN	05/11/2019 09h	23/06/2025 10h	6	0,13	0,85	-0,31	-0,24
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	AT_P	13/06/2018 13h	23/06/2025 10h	27	0,54	0,19	-0,01	0,06
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	AL_P	03/10/2018 18h	23/06/2025 10h	11	0,28	0,36	-0,06	0,16
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	IN_P	05/11/2019 09h	23/06/2025 10h	7	0,14	0,53	-0,08	0,05
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	AT_AT	13/06/2018 13h	29/06/2025 01h	26	0,55	0,16	0,08	-0,06
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	AL_AL	03/10/2018 18h	29/06/2025 01h	11	0,31	0,58	-0,15	-0,18
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	IN_IN	05/11/2019 09h	29/06/2025 01h	6	0,13	0,85	-0,31	-0,24
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	AT_P	13/06/2018 13h	29/06/2025 01h	27	0,54	0,19	-0,01	0,06
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	AL_P	03/10/2018 18h	29/06/2025 01h	12	0,28	0,36	-0,06	0,16
86720000	Encantado	Junho e Julho/2025	IN_P	05/11/2019 09h	29/06/2025 01h	7	0,14	0,53	-0,08	0,05
86879300	Estrela	Novembro/2023	AT_AT	29/05/2021 13h	17/11/2023 03h	12	0,17	0,41	0,29	-0,18
86879300	Estrela	Novembro/2023	AL_AL	03/05/2022 03h	17/11/2023 03h	7	0,18	0,33	0,32	-0,26
86879300	Estrela	Novembro/2023	IN_IN	03/05/2022 10h	17/11/2023 03h	6	-0,06	0,60	0,24	-0,21
86879300	Estrela	Novembro/2023	AT_P	29/05/2021 13h	17/11/2023 03h	12	-0,02	0,51	0,19	0,05
86879300	Estrela	Novembro/2023	AL_P	03/05/2022 03h	17/11/2023 03h	7	-0,01	0,33	0,23	-0,04
86879300	Estrela	Novembro/2023	IN_P	03/05/2022 10h	17/11/2023 03h	6	0,01	0,34	0,17	-0,07
86879300	Estrela	Abril e Maio/2024	AT_AT	29/05/2021 13h	29/04/2024 14h	14	-0,28	0,99	0,15	-0,13
86879300	Estrela	Abril e Maio/2024	AL_AL	03/05/2022 03h	29/04/2024 14h	8	-0,29	0,99	0,14	-0,16
86879300	Estrela	Abril e Maio/2024	IN_IN	03/05/2022 10h	29/04/2024 14h	7	-0,09	0,60	0,21	-0,21

Código	Nome	Evento	Cenário	Início	Fim	Nº de eventos	M1	M2	J	C
86879300	Estrela	Abril e Maio/2024	AT_P	29/05/2021 13h	29/04/2024 14h	14	-0,36	0,99	0,05	0,16
86879300	Estrela	Abril e Maio/2024	AL_P	03/05/2022 03h	29/04/2024 14h	8	-0,28	0,99	-0,02	0,17
86879300	Estrela	Abril e Maio/2024	IN_P	03/05/2022 10h	29/04/2024 14h	7	0,24	0,10	0,30	-0,13
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	AT_AT	29/05/2021 13h	17/06/2025 16h	20	-0,29	0,99	0,06	-0,13
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	AL_AL	03/05/2022 03h	17/06/2025 16h	12	-0,26	0,99	-0,02	-0,20
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	IN_IN	03/05/2022 10h	17/06/2025 16h	11	-0,09	0,90	-0,27	-0,18
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	AT_P	29/05/2021 13h	17/06/2025 16h	21	-0,46	0,99	0,14	0,21
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	AL_P	03/05/2022 03h	17/06/2025 16h	12	-0,42	0,99	0,02	0,34
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	IN_P	03/05/2022 10h	17/06/2025 16h	11	-0,36	0,93	0,06	-0,05
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	AT_AT	29/05/2021 13h	23/06/2025 08h	21	-0,29	0,99	0,08	-0,14
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	AL_AL	03/05/2022 03h	23/06/2025 08h	13	-0,28	0,99	0,03	-0,20
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	IN_IN	03/05/2022 10h	23/06/2025 08h	12	-0,18	0,99	-0,23	-0,12
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	AT_P	29/05/2021 13h	23/06/2025 08h	22	-0,44	0,99	0,10	0,23
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	AL_P	03/05/2022 03h	23/06/2025 08h	13	-0,39	0,99	-0,06	0,44
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	IN_P	03/05/2022 10h	23/06/2025 08h	12	-0,45	0,99	0,01	0,25
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	AT_AT	29/05/2021 13h	29/06/2025 00h	21	-0,29	0,99	0,07	-0,13
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	AL_AL	03/05/2022 03h	29/06/2025 00h	13	-0,30	0,99	0,04	-0,20
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	IN_IN	03/05/2022 10h	29/06/2025 00h	12	-0,18	0,99	-0,23	-0,12
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	AT_P	29/05/2021 13h	29/06/2025 00h	22	-0,44	0,99	0,10	0,23
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	AL_P	03/05/2022 03h	29/06/2025 00h	14	-0,39	0,99	-0,06	0,44
86879300	Estrela	Junho e Julho/2025	IN_P	03/05/2022 10h	29/06/2025 00h	12	-0,45	0,99	0,01	0,25
86950000	Taquari	Novembro/2023	AT_AT	02/05/2022 08h	16/11/2023 18h	11	0,23	0,10	0,12	-0,01
86950000	Taquari	Novembro/2023	AL_AL	03/05/2022 14h	16/11/2023 18h	7	0,06	0,11	0,65	-0,03
86950000	Taquari	Novembro/2023	IN_IN	18/11/2023 16h	16/11/2023 18h	-	0,10	0,10	0,10	0,10
86950000	Taquari	Novembro/2023	AT_P	02/05/2022 08h	16/11/2023 18h	11	0,41	0,07	-0,29	0,10
86950000	Taquari	Novembro/2023	AL_P	03/05/2022 14h	16/11/2023 18h	7	-0,31	0,15	0,79	0,02
86950000	Taquari	Novembro/2023	IN_P	18/11/2023 16h	16/11/2023 18h	-	0,10	0,10	0,10	0,10

Tabela 4.2. Métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Taquari – parte 1.

Cenário	Código		86510000				86720000			
	Nome		Muçum				Encantado			
	Início do evento		17/11/23 03h	01/05/24 08h	23/06/25 14h	29/06/25 08h	17/11/23 22h	18/06/25 07h	23/06/25 19h	29/06/25 10h
	Fim do evento		20/11/23 15h	02/05/24 00h	24/06/25 14h	01/07/25 00h	20/11/23 10h	19/06/25 19h	24/06/25 03h	30/06/25 14h
AT_AT	EMA (m)		**0,4**	**0,99**	**0,22**	0,36	**0,48**	**0,3**	0,17	**0,3**
AL_AL			0,43	1,14	0,23	0,34	**0,48**	0,34	**0,12**	0,33
IN_IN			0,38	1,52	0,26	**0,33**	0,55	0,35	0,15	0,37
AT_P			0,43	0,86	0,44	0,67	0,52	0,32	0,21	0,37
AL_P			0,51	1,08	0,53	0,75	0,61	0,35	0,31	0,52
IN_P			0,48	1,33	0,52	0,66	0,74	0,4	0,29	0,5
Benchmark			0,39	1,03	0,19	0,19	**0,48**	0,28	0,17	0,27
AT_AT	EMA (até o pico)		0,46	1,23	**0,35**	**0,54**	**0,57**	0,34	**0,19**	0,42
AL_AL			0,57	1,39	0,43	0,55	0,65	0,42	0,18	0,53
IN_IN			0,47	1,81	0,56	0,58	0,85	0,45	0,2	0,61
AT_P			**0,42**	**1,06**	0,38	0,68	0,57	**0,32**	0,2	**0,41**
AL_P			0,45	1,25	0,38	0,66	0,63	0,37	0,29	0,47
IN_P			0,49	1,58	0,62	0,72	0,68	0,4	0,3	0,52
Benchmark			0,44	1,19	0,35	0,34	0,59	0,34	0,15	0,4
AT_AT	EMR (%)		-0,3	**-0,68**	-0,75	-0,73	-0,36	**0,16**	**-0,26**	-0,28
AL_AL			-1,45	-2,36	-1,23	-1,15	-1,25	-1,15	-0,9	-1,32
IN_IN			-0,76	-2,78	-1,93	-1,76	-1,42	-1,39	-1,16	-1,87
AT_P			0,38	-0,82	1,09	0,89	**0,06**	0,77	-0,3	**0,01**
AL_P			0,27	-1,95	2,54	2,1	0,28	0,46	0,92	0,52
IN_P			**-0,23**	-3,2	**0,27**	**0,19**	0,88	1	0,74	-0,11
Benchmark			-1,32	-1,81	0,07	-0,7	-1,12	-0,44	0,68	-0,06
AT_AT	EMR (até o pico) (%)		**-1,23**	**-0,9**	-3,26	-3,45	**-1,36**	-1,08	-1,18	**-2,27**
AL_AL			-3,74	-3,22	-3,76	-3,9	-3,2	-2,41	-1,33	-3,79
IN_IN			-2,13	-4,03	-4,47	-4,37	-4,01	-2,73	-1,35	-4,87
AT_P			-1,11	-1,14	-3,56	-4,14	-1,68	**-0,82**	-1,63	-2,97
AL_P			-2,89	-3,03	**-2,37**	**-3,15**	-3,02	-1,21	-0,48	-3,91
IN_P			-3,05	-4,6	-4,93	-5,15	-3,17	-0,9	**-0,28**	-4,52
Benchmark			-1,63	-1,88	-0,64	-1,73	-1,48	-1,34	-0,05	-1,4
AT_AT	Diferença no pico (m)		-0,28	-1,66	**0,01**	**-0,01**	-0,26	**-0,12**	-0,08	-0,05
AL_AL			0,26	-1,54	-0,05	0,09	**-0,13**	-0,14	-0,06	**-0,02**
IN_IN			0,08	-2,06	-0,12	0,11	-0,44	-0,18	-0,07	**-0,02**

Cenário	Código	86510000				86720000			
	Nome	Muçum				Encantado			
	Início do evento	17/11/23 03h	01/05/24 08h	23/06/25 14h	29/06/25 08h	17/11/23 22h	18/06/25 07h	23/06/25 19h	29/06/25 10h
	Fim do evento	20/11/23 15h	02/05/24 00h	24/06/25 14h	01/07/25 00h	20/11/23 10h	19/06/25 19h	24/06/25 03h	30/06/25 14h
AT_P	Deslocamento do pico (h)	-0,26	-1,38	-0,06	-0,09	-0,29	-0,15	**-0,05**	-0,11
AL_P		**0,06**	**-1,33**	-0,26	-0,24	-0,2	-0,23	-0,25	-0,3
IN_P		0,2	-1,38	-0,14	-0,08	-0,45	-0,32	-0,28	-0,27
Benchmark		0,12	-1,45	-0,22	-0,03	-0,17	0	-0,14	-0,03
AT_AT		-4	**0**	**0**	-4	-4	**0**	**0**	4
AL_AL		**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	4
IN_IN		-4	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	4
AT_P		-4	**0**	4	-4	-4	**0**	**0**	4
AL_P		**0**	**0**	4	**0**	**0**	**0**	**0**	4
IN_P		**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	4
Benchmark		-4	0	0	-4	-4	0	0	0

Tabela 4.3 Métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Taquari – parte 2.

Cenário	Código		86879300				86950000
	Nome		Estrela				Taquari
	Início do evento	17/11/23 16h	30/04/24 03h	18/06/25 05h	23/06/25 21h	29/06/25 13h	17/11/23 07h
	Fim do evento	18/11/23 22h	30/04/24 21h	20/06/25 23h	24/06/25 15h	01/07/25 01h	18/11/23 19h
AT_AT	EMA (m)	0,71	**0,69**	**0,41**	0,23	**0,31**	0,15
AL_AL		0,77	0,77	0,42	0,2	0,33	0,15
IN_IN		0,72	1,16	0,58	**0,13**	0,44	0,09
AT_P		**0,64**	0,84	0,58	0,55	0,58	0,15
AL_P		0,86	0,85	0,63	0,53	0,6	0,15
IN_P		0,91	1,37	0,48	0,52	0,55	**0,09**
Benchmark		0,74	1,85	0,49	0,62	0,25	-
AT_AT	EMA (até o pico)	0,71	**0,69**	0,58	0,38	**0,45**	0,15
AL_AL		0,77	0,77	0,57	0,34	**0,45**	0,15
IN_IN		0,72	1,16	0,65	**0,09**	0,53	0,09
AT_P		**0,64**	0,84	0,55	0,53	0,58	0,15
AL_P		0,86	0,85	**0,45**	0,38	0,46	0,15
IN_P		0,91	1,37	0,58	0,48	0,48	**0,09**
Benchmark		0,74	1,85	0,66	0,48	0,26	-
AT_AT	EMR (%)	**-1,84**	**-3,21**	-0,28	0,53	-0,58	0
AL_AL		-2,55	-3,57	-0,69	**-0,01**	-1,07	0,32
IN_IN		-2,76	-5,39	-0,75	-0,53	-1,47	**-0,17**
AT_P		-2,33	-3,89	1,14	1,98	0,76	0,8
AL_P		-3,91	-3,92	1,72	2,61	1,33	-1,73
IN_P		-4,14	-6,37	**-0,2**	1,6	**0,45**	**-0,17**
Benchmark		-1,69	-8,61	-1,05	3,51	0,49	-
AT_AT	EMR (até o pico) (%)	**-1,84**	**-3,21**	-1,58	0,55	-1,07	**0**
AL_AL		-2,55	-3,57	-2,26	**-0,04**	-1,78	0,32
IN_IN		-2,76	-5,39	-3,24	-0,41	-2,64	-0,17
AT_P		-2,33	-3,89	-0,8	0,7	-0,83	0,8
AL_P		-3,91	-3,92	**-0,63**	1,42	**-0,62**	-1,73
IN_P		-4,14	-6,37	-2,29	0,04	-1,66	-0,17
Benchmark		-1,69	-8,61	-2,24	2,68	-0,06	-
AT_AT	Diferença no pico (m)	-0,08	**0,27**	0,37	-0,48	0,04	-0,17
AL_AL		**0,07**	0,37	0,56	-0,33	0,15	-0,27
IN_IN		0,2	0,59	0,77	**-0,02**	0,39	-0,11
AT_P		0,13	0,64	**-0,08**	-0,65	-0,32	-0,14
AL_P		0,48	0,67	**-0,08**	-0,63	-0,35	**-0,09**
IN_P		0,55	0,53	0,28	-0,48	**-0,23**	-0,11
Benchmark		0,45	2	0,85	-0,68	-0,09	-
AT_AT	Deslocamento do pico (h)	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
AL_AL		**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
IN_IN		**0**	**0**	6	**0**	**0**	**0**
AT_P		**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
AL_P		**0**	**0**	6	**0**	**0**	**0**
IN_P		**0**	**0**	6	**0**	**0**	**0**
Benchmark		0	0	0	0	0	-

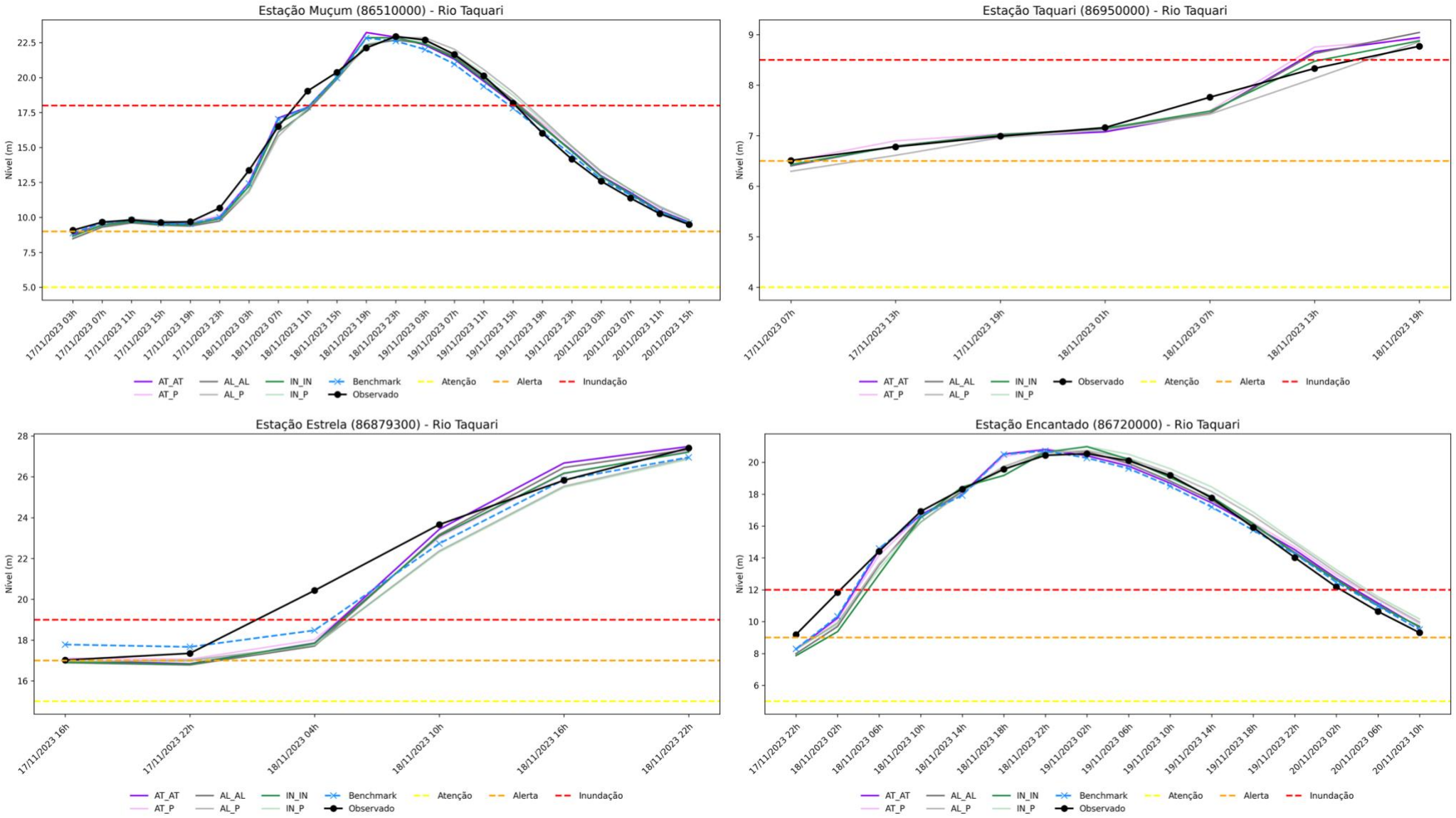

Figura 4.1. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Taquari – parte 1.

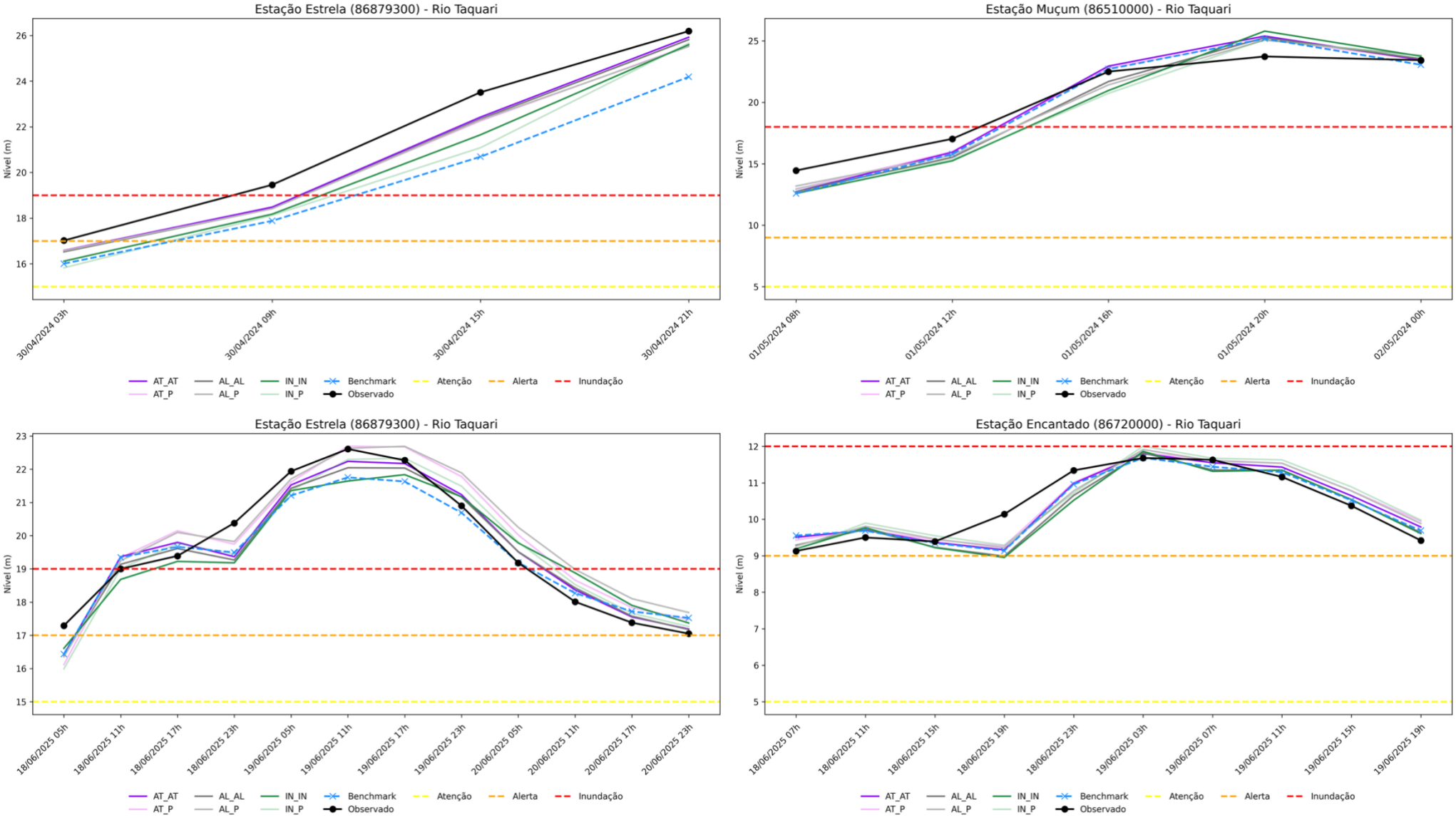

Figura 4.2. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Taquari – parte 2.

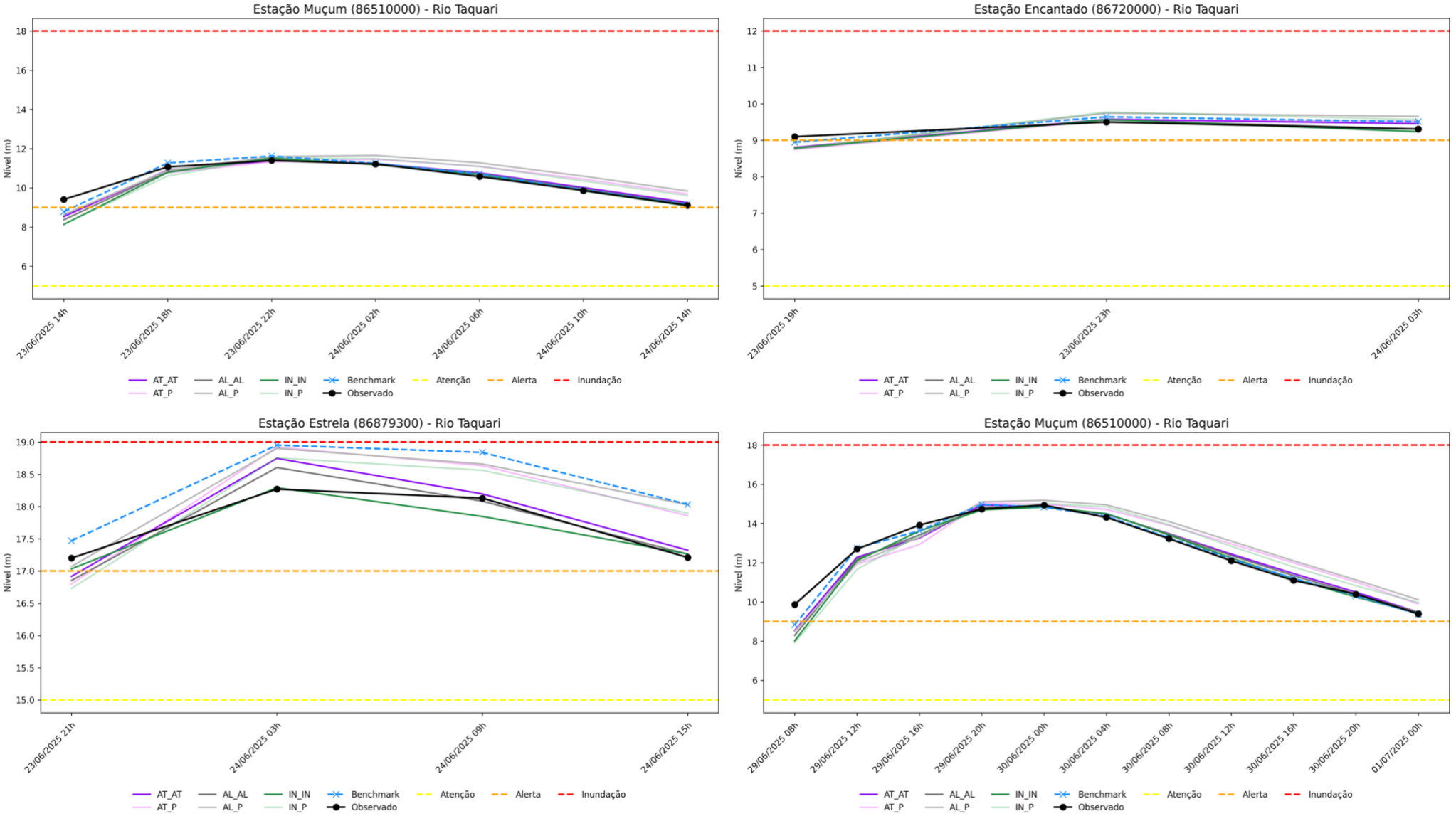

Figura 4.3 Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Taquari – parte 3.

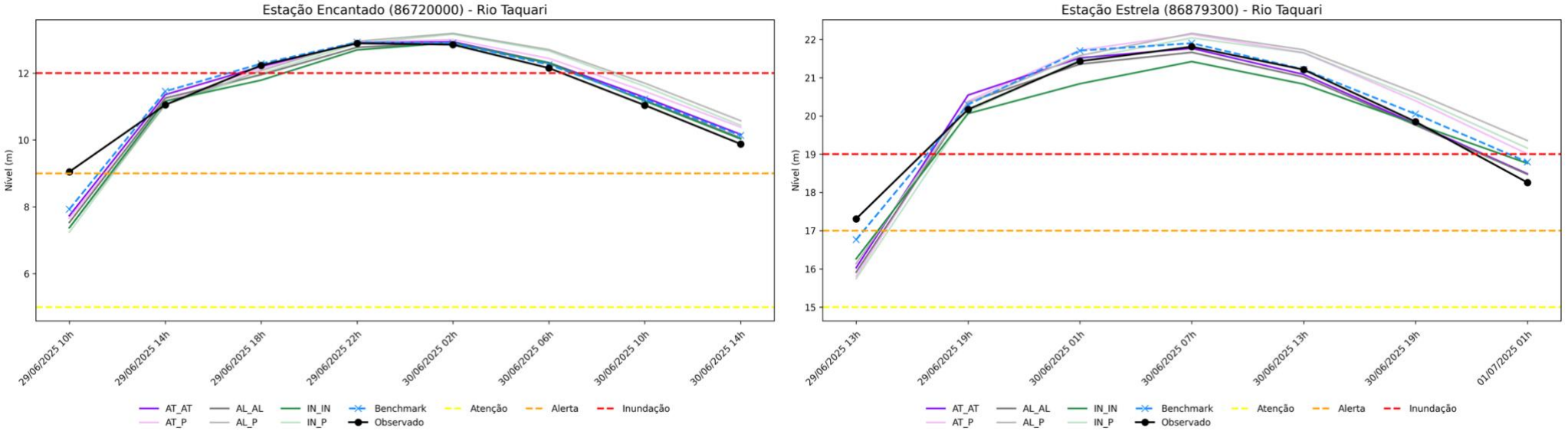

Figura 4.4. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Taquari – parte 4.

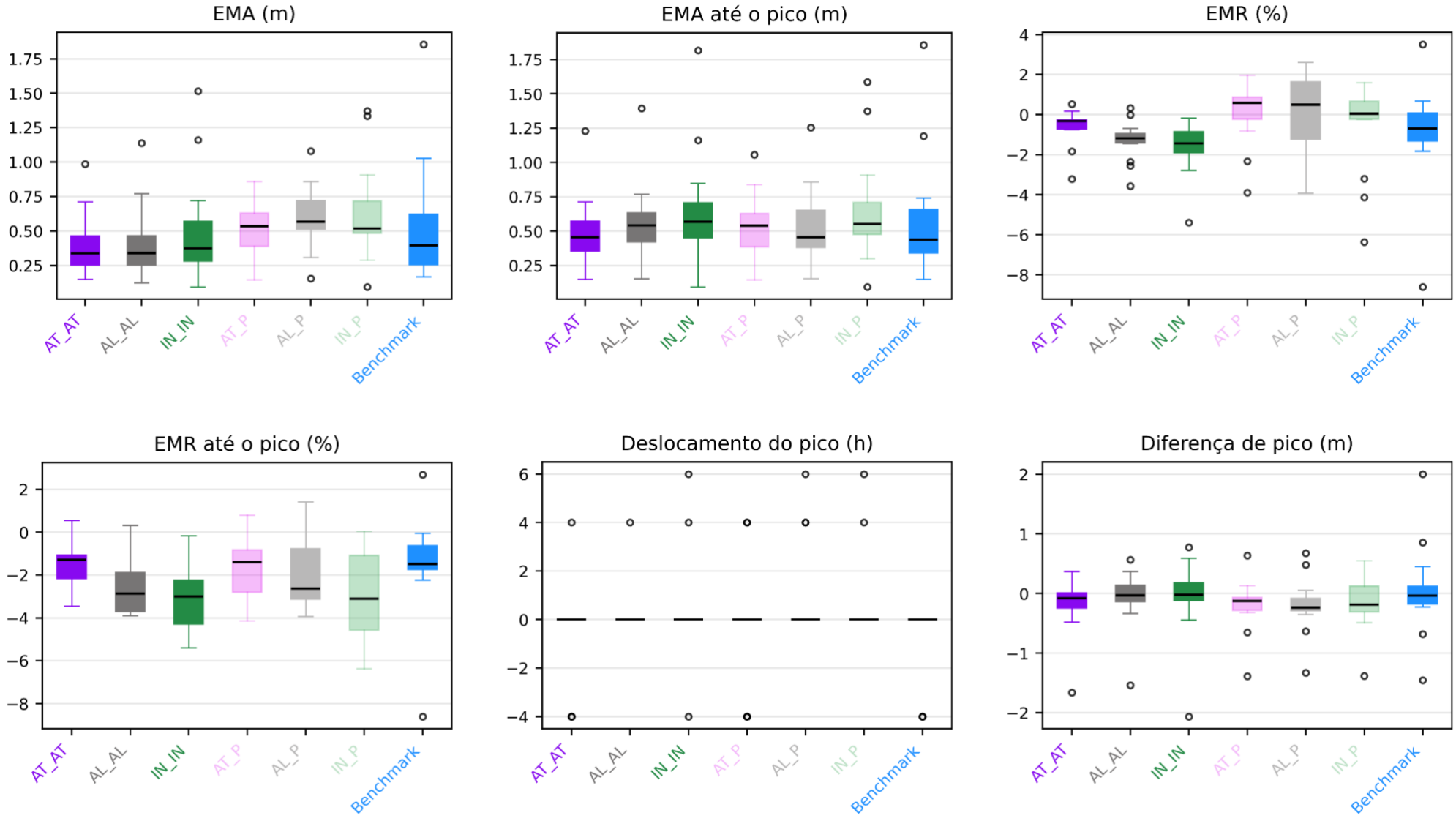

Figura 4.5. Boxplots com as métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Taquari.

4.1.2 Bacia do rio Caí

Na bacia do rio Caí, em função das falhas de medição observadas na estação Passo Montenegro (87270000), as previsões foram realizadas exclusivamente para a estação Barca do Caí (87170000) (Tabela 4.4). A Tabela 4.5 mostra os resultados das métricas por evento, a Figura 4.6 e Figura 4.7 mostram os gráficos das previsões e a Figura 4.8 mostra os boxplots com os resultados das métricas para toda a bacia.

De modo geral, observou-se elevada dispersão entre as previsões dos diferentes cenários, com destaque para o cenário de inundação até o pico, que apresentou acentuado viés positivo, caracterizando superestimativa sistemática das previsões.

O EMA apresentou valores semelhantes entre os cenários definidos entre limiares, com medianas inferiores a 0,5 m. Em contrapartida, nos cenários avaliados até o pico, as medianas do erro foram superiores a 0,6 m, ultrapassando 1 m no cenário de inundação até o pico. No entanto, ao se restringir a análise apenas à fase de subida do hidrograma, o EMR até o pico indicou valores medianos menores nos cenários até o pico quando comparados aos cenários definidos entre limiar e limiar.

De forma geral, o EMR evidenciou uma tendência de subestimativa nos cenários entre os limiares e de superestimativa nos cenários até o pico. Ainda assim, ao se analisar especificamente o EMR até o pico, os cenários até o pico apresentaram menores subestimativas em relação aos cenários de limiar até limiar. No deslocamento temporal até o pico, os cenários de alerta e inundação definidos até seus respectivos limiares destacaram-se pelo melhor desempenho, apresentando mediana igual a zero. Já na métrica de diferença de pico, os cenários AT_AT, AL_AL e AT_P mostraram mais acurácia, estando mais próximos dos picos do observado.

É importante destacar que, nas previsões, são utilizadas informações da estação de montante 86168000 (São Vendelino), localizada no Arroio Mauá, afluente do rio Caí. Por se tratar de um afluente com dinâmica hidrológica distinta, sua resposta hidrológica pode apresentar diferenças de fase e magnitude em relação ao rio principal, reduzindo a representatividade dessa informação para o ponto de previsão e contribuindo para o aumento da dispersão das previsões.

Tabela 4.4. Informações sobre a calibração dos modelos empíricos da bacia do rio do Caí.

Código	Nome	Evento	Cenário	Início	Fim	Nº de eventos	M1	M2	J	C
87170000	Barca do Caí	Setembro/2023	AT_AT	25/06/2018 18h	03/09/2023 13h	43	0,60	0,40	0,34	-0,15
87170000	Barca do Caí	Setembro/2023	AL_AL	25/06/2018 23h	03/09/2023 13h	26	0,30	0,36	0,42	-0,21
87170000	Barca do Caí	Setembro/2023	IN_IN	25/08/2018 11h	03/09/2023 13h	6	-0,16	0,37	0,44	-0,29
87170000	Barca do Caí	Setembro/2023	AT_P	25/06/2018 18h	03/09/2023 13h	44	0,71	0,26	0,27	0,23
87170000	Barca do Caí	Setembro/2023	AL_P	25/06/2018 23h	03/09/2023 13h	28	0,52	0,03	0,26	0,76
87170000	Barca do Caí	Setembro/2023	IN_P	25/08/2018 11h	03/09/2023 13h	7	0,13	0,31	0,34	0,19
87170000	Barca do Caí	Setembro/2023	AT_AT	25/06/2018 18h	12/09/2023 19h	44	0,57	0,39	0,35	-0,16
87170000	Barca do Caí	Setembro/2023	AL_AL	25/06/2018 23h	12/09/2023 19h	27	0,30	0,36	0,44	-0,20
87170000	Barca do Caí	Setembro/2023	IN_IN	25/08/2018 11h	12/09/2023 19h	7	-0,14	0,39	0,50	-0,27
87170000	Barca do Caí	Setembro/2023	AT_P	25/06/2018 18h	12/09/2023 19h	45	0,68	0,25	0,27	0,24
87170000	Barca do Caí	Setembro/2023	AL_P	25/06/2018 23h	12/09/2023 19h	29	0,52	0,02	0,28	0,75
87170000	Barca do Caí	Setembro/2023	IN_P	25/08/2018 11h	12/09/2023 19h	8	0,99	-0,37	0,35	0,99
87170000	Barca do Caí	Novembro/2023	AT_AT	25/06/2018 18h	12/11/2023 12h	44	0,74	0,36	0,36	-0,11
87170000	Barca do Caí	Novembro/2023	AL_AL	25/06/2018 23h	12/11/2023 12h	29	0,34	0,37	0,42	-0,15
87170000	Barca do Caí	Novembro/2023	IN_IN	25/08/2018 11h	12/11/2023 12h	8	-0,14	0,39	0,50	-0,27
87170000	Barca do Caí	Novembro/2023	AT_P	25/06/2018 18h	12/11/2023 12h	46	0,75	0,25	0,27	0,25
87170000	Barca do Caí	Novembro/2023	AL_P	25/06/2018 23h	12/11/2023 12h	32	0,61	-0,02	0,46	0,33
87170000	Barca do Caí	Novembro/2023	IN_P	25/08/2018 11h	12/11/2023 12h	9	0,99	-0,37	0,35	0,99
87170000	Barca do Caí	Junho e Julho/2025	AT_AT	25/06/2018 18h	17/06/2025 02h	63	0,73	0,37	0,36	-0,11
87170000	Barca do Caí	Junho e Julho/2025	AL_AL	25/06/2018 23h	17/06/2025 02h	36	0,33	0,37	0,42	-0,15
87170000	Barca do Caí	Junho e Julho/2025	IN_IN	25/08/2018 11h	17/06/2025 02h	11	-0,17	0,40	0,49	-0,29
87170000	Barca do Caí	Junho e Julho/2025	AT_P	25/06/2018 18h	17/06/2025 02h	65	0,73	0,26	0,27	0,25
87170000	Barca do Caí	Junho e Julho/2025	AL_P	25/06/2018 23h	17/06/2025 02h	39	0,61	-0,02	0,46	0,33
87170000	Barca do Caí	Junho e Julho/2025	IN_P	25/08/2018 11h	17/06/2025 02h	12	0,99	-0,37	0,35	0,99
87170000	Barca do Caí	Junho e Julho/2025	AT_AT	25/06/2018 18h	28/06/2025 07h	64	0,75	0,36	0,37	-0,11
87170000	Barca do Caí	Junho e Julho/2025	AL_AL	25/06/2018 23h	28/06/2025 07h	37	0,39	0,37	0,43	-0,14
87170000	Barca do Caí	Junho e Julho/2025	IN_IN	25/08/2018 11h	28/06/2025 07h	12	-0,12	0,38	0,49	-0,31
87170000	Barca do Caí	Junho e Julho/2025	AT_P	25/06/2018 18h	28/06/2025 07h	66	0,75	0,25	0,28	0,25

Código	Nome	Evento	Cenário	Início	Fim	Nº de eventos	M1	M2	J	C
87170000	Barca do Caí	Junho e Julho/2025	AL_P	25/06/2018 23h	28/06/2025 07h	40	0,63	-0,02	0,46	0,34
87170000	Barca do Caí	Junho e Julho/2025	IN_P	25/08/2018 11h	28/06/2025 07h	13	0,99	-0,37	0,35	0,99

Tabela 4.5. Métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Caí.

Cenário	Código	87170000	87170000	87170000	87170000	87170000
	Nome	Barca do Caí	Barca do Caí	Barca do Caí	Barca do Caí	Barca do Caí
	Início do evento	04/09/23 10h	13/09/23 16h	13/11/23 09h	17/06/25 23h	29/06/25 04h
	Fim do evento	11/09/23 02h	16/09/23 14h	17/11/23 23h	25/06/25 11h	02/07/25 12h
AT_AT		0,38	**0,28**	0,61	**0,44**	**0,59**
AL_AL		**0,36**	0,3	**0,54**	0,45	0,63
IN_IN		0,41	0,42	0,61	0,48	0,69
AT_P	EMA (m)	0,58	0,46	0,71	0,66	0,87
AL_P		0,99	0,84	0,7	0,72	1,05
IN_P		0,61	1,01	1,14	1,17	1,54
Benchmark		1,24	0,93	1,32	1,29	1,6
AT_AT		1,01	0,65	1,8	0,86	1,28
AL_AL		1,01	0,76	1,45	0,88	1,42
IN_IN		1,13	1,05	1,57	1,02	1,84
AT_P	EMA (até o pico)	0,84	**0,53**	1,54	0,73	**1,19**
AL_P		**0,64**	0,58	1,15	**0,71**	1,55
IN_P		0,92	0,72	**0,81**	0,76	1,43
Benchmark		3,06	1,81	3,74	2,68	3,62
AT_AT		-1,92	-2,83	-3,28	-1,98	-2,64
AL_AL		-2,19	-3,06	-3,64	-2,24	-2,79
IN_IN		-2,89	-3,76	-4,83	-3,52	-4,45
AT_P	EMR (%)	1,72	**1,52**	**0,1**	**1,56**	**0,74**
AL_P		6,97	7,53	1,49	2,86	2,15
IN_P		**1,6**	10,45	7,98	9,46	8,4
Benchmark		-3,97	-5,3	-7,61	-6,25	-8,36
AT_AT		-8,26	-7,72	-10,78	-8,13	-12,43
AL_AL		-7,87	-8,14	-11,58	-8,32	-12,43
IN_IN		-9,19	-9,74	-12,92	-9,49	-14,31
AT_P	EMR (até o pico) (%)	-7,52	-4,23	-10,81	-6,9	-11,59
AL_P		**-5,7**	**0,38**	-9,44	-4,22	-9,53
IN_P		-7,17	4,23	**-8,27**	**-0,67**	**-7,09**
Benchmark		-27,28	-21,53	-38,23	-25,17	-35,22
AT_AT		0,56	**0,07**	-0,14	0,51	0,21
AL_AL		0,47	-0,11	0,19	0,22	-0,21
IN_IN		0,4	-0,34	-0,45	**-0,04**	-0,55
AT_P	Diferença no pico (m)	0,3	-0,17	**0,12**	0,23	**-0,09**
AL_P		-0,63	-0,74	-0,53	-0,36	-0,85
IN_P		**0,06**	-0,89	-1,38	-0,89	-1,34
Benchmark		-0,06	-0,03	0,01	0,23	0,53
AT_AT		**-10**	**0**	-10	-10	**0**
AL_AL		**-10**	**0**	**0**	**0**	**0**
IN_IN		10	**0**	**0**	**0**	**0**
AT_P	Deslocamento do pico (h)	10	10	10	10	10
AL_P		10	10	10	**0**	**0**
IN_P		10	10	10	10	10
Benchmark		10	20	10	10	10

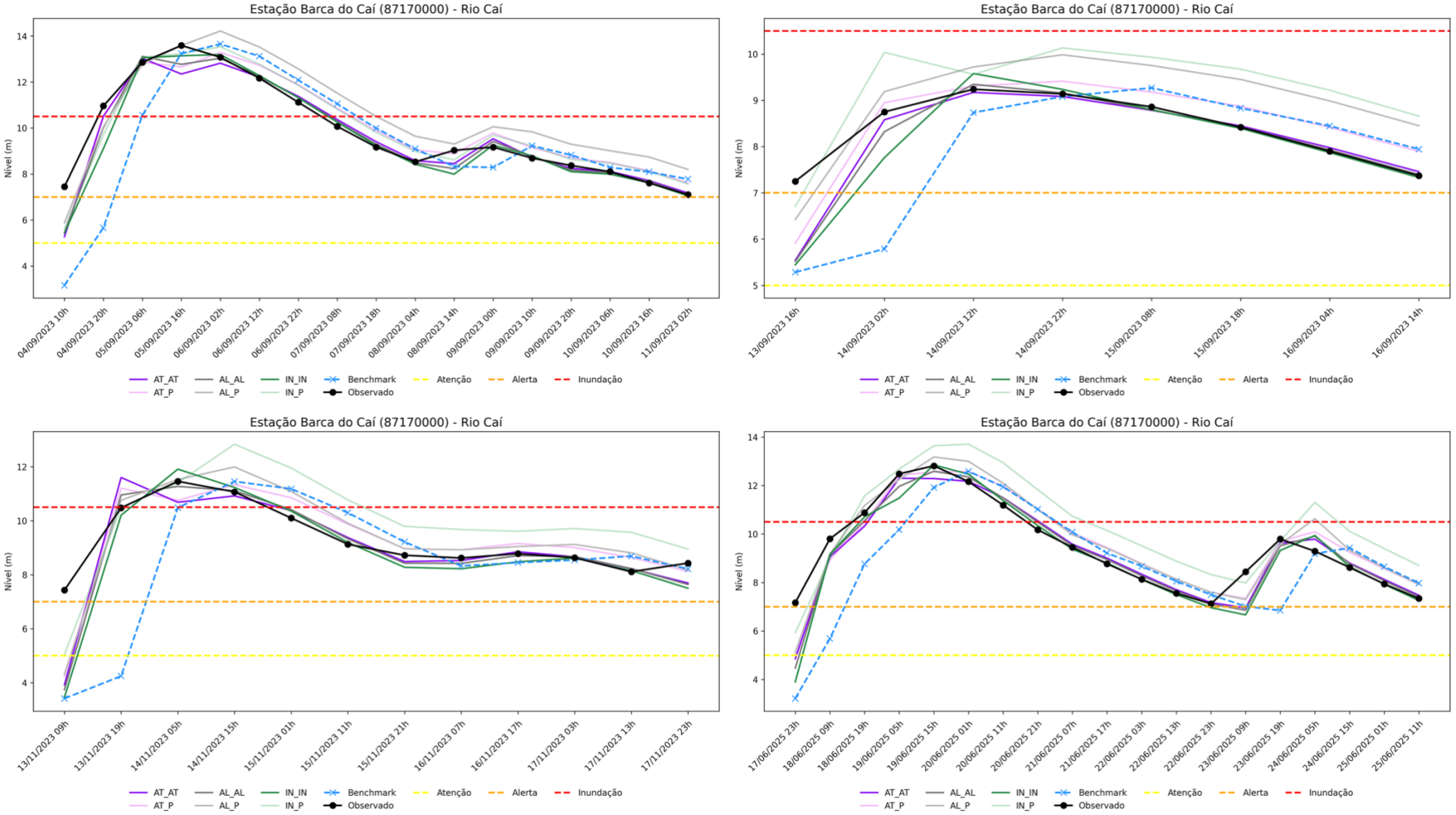

Figura 4.6. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Caí – parte 1.

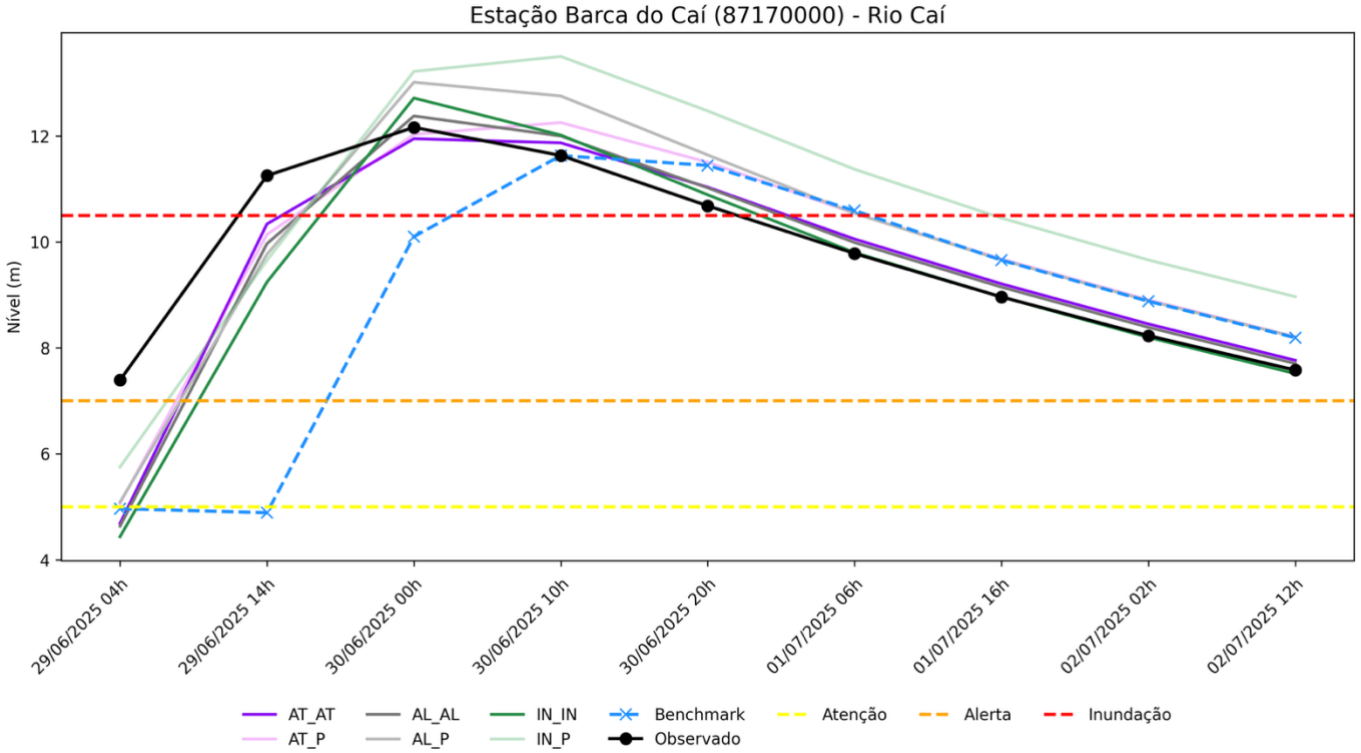

Figura 4.7. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Caí – parte 2.

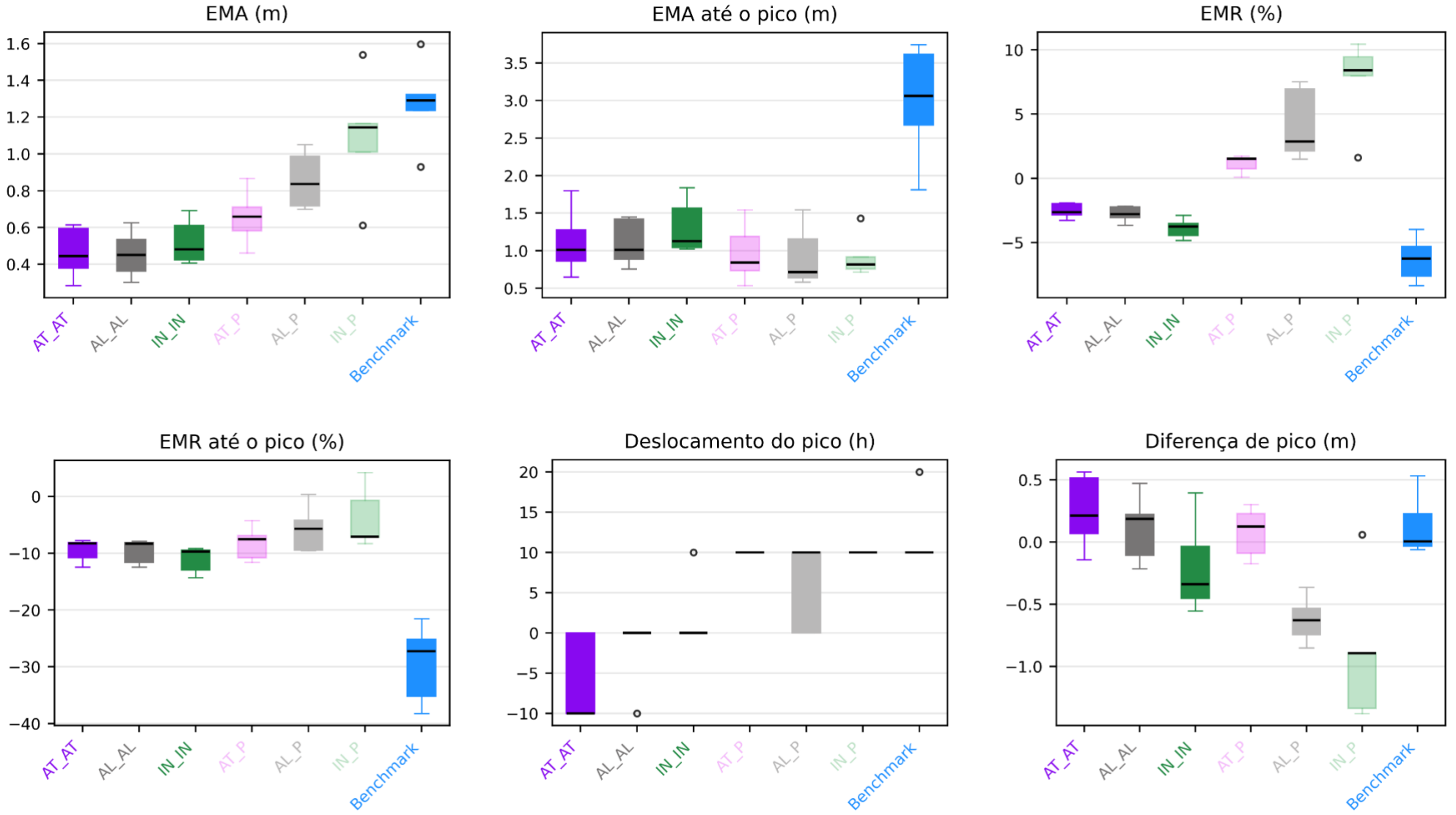

Figura 4.8. Boxplots com as métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Caí

4.1.3 Bacia do rio Uruguai

Na bacia do rio Uruguai todos os eventos foram medidos por pelo menos uma estação da bacia (Tabela 4.6). A Tabela 4.7 mostra os resultados das métricas por evento, a Figura 4.9 a Figura 4.12 mostras os gráficos das previsões e a Figura 4.13 mostra os *boxplots* com os resultados das métricas para toda a bacia. Em um contexto geral as previsões mostraram convergência entre si, refletindo nos resultados das métricas, cujas medianas foram muito parecidas. A mediana do EMA foi inferior a 0,1 metros tanto nos eventos completos quanto na análise até o pico. O EMR também foi muito equilibrado entre os cenários, com uma leve superestimativa dos valores, nos cenários até o pico. Destaca-se o desempenho das previsões dos cenários até o pico no EMR até o pico, cujo valor da mediana ficou em torno de zero.

O deslocamento de pico foi equilibrado entre os cenários, apresentando mediana de 5 horas. Observou-se uma tendência de atraso de pico nos cenários entre os limiares. A diferença de pico foi equilibrada entre os cenários, com valores medianos próximos a zero e uma leve tendência de superestimativa dos cenários até o pico. Os baixos erros encontrados na bacia do rio Uruguai podem ser classificados como erros ligados a medição dos equipamentos que medem níveis de água.

Tabela 4.6. Informações sobre a calibração dos modelos empíricos da bacia do rio Uruguai.

Código	Nome	Evento	Cenário	Início	Fim	Nº de eventos	M1	M2	J	C
75780000	Passo São Borja	Setembro/2023	AT_AT	06/09/2018 05h	05/09/2023 06h	16	0,28	-	0,46	-0,02
75780000	Passo São Borja	Setembro/2023	AL_AL	11/05/2019 23h	05/09/2023 06h	10	0,24	-	0,51	-0,03
75780000	Passo São Borja	Setembro/2023	IN_IN	13/05/2019 10h	05/09/2023 06h	7	0,24	-	0,48	0,00
75780000	Passo São Borja	Setembro/2023	AT_P	06/09/2018 05h	05/09/2023 06h	16	0,34	-	0,21	0,09
75780000	Passo São Borja	Setembro/2023	AL_P	11/05/2019 23h	05/09/2023 06h	10	0,27	-	0,17	0,15
75780000	Passo São Borja	Setembro/2023	IN_P	13/05/2019 10h	05/09/2023 06h	7	0,27	-	0,01	0,22
75900000	Itaqui	Abril e Maio/2024	AT_AT	04/09/2011 07h	18/04/2024 13h	63	0,49	-	-0,05	0,02
75900000	Itaqui	Abril e Maio/2024	AL_AL	04/09/2011 07h	18/04/2024 13h	34	0,41	-	-0,05	0,02
75900000	Itaqui	Abril e Maio/2024	IN_IN	28/06/2014 17h	18/04/2024 13h	17	0,26	-	0,13	0,01
75900000	Itaqui	Abril e Maio/2024	AT_P	04/09/2011 07h	18/04/2024 13h	64	0,18	-	0,63	0,02
75900000	Itaqui	Abril e Maio/2024	AL_P	04/09/2011 07h	18/04/2024 13h	35	0,12	-	0,77	0,00
75900000	Itaqui	Abril e Maio/2024	IN_P	28/06/2014 17h	18/04/2024 13h	18	0,13	-	0,76	0,02
75900000	Itaqui	Abril e Maio/2024	AT_AT	04/09/2011 07h	02/05/2024 06h	63	0,48	-	-0,04	0,02
75900000	Itaqui	Abril e Maio/2024	AL_AL	04/09/2011 07h	02/05/2024 06h	35	0,41	-	-0,05	0,02
75900000	Itaqui	Abril e Maio/2024	IN_IN	28/06/2014 17h	02/05/2024 06h	17	0,26	-	0,13	0,01
75900000	Itaqui	Abril e Maio/2024	AT_P	04/09/2011 07h	02/05/2024 06h	64	0,18	-	0,63	0,02
75900000	Itaqui	Abril e Maio/2024	AL_P	04/09/2011 07h	02/05/2024 06h	36	0,12	-	0,77	0,00
75900000	Itaqui	Abril e Maio/2024	IN_P	28/06/2014 17h	02/05/2024 06h	18	0,13	-	0,76	0,02
76310000	Rosário do Sul	Setembro/2023	AT_AT	27/10/2005 15h	24/09/2023 03h	35	-	-	-0,09	-0,01
76310000	Rosário do Sul	Setembro/2023	AL_AL	15/07/2006 21h	24/09/2023 03h	24	-	-	-0,19	-0,01
76310000	Rosário do Sul	Setembro/2023	IN_IN	15/07/2006 21h	24/09/2023 03h	11	-	-	-0,06	-0,03
76310000	Rosário do Sul	Setembro/2023	AT_P	27/10/2005 15h	24/09/2023 03h	35	-	-	-0,10	0,11
76310000	Rosário do Sul	Setembro/2023	AL_P	15/07/2006 21h	24/09/2023 03h	24	-	-	-0,11	0,11
76310000	Rosário do Sul	Setembro/2023	IN_P	15/07/2006 21h	24/09/2023 03h	11	-	-	-0,42	0,08
76310000	Rosário do Sul	Novembro/2023	AT_AT	27/10/2005 15h	15/11/2023 08h	36	-	-	-0,09	-0,01
76310000	Rosário do Sul	Novembro/2023	AL_AL	15/07/2006 21h	15/11/2023 08h	25	-	-	-0,19	-0,01
76310000	Rosário do Sul	Novembro/2023	IN_IN	15/07/2006 21h	15/11/2023 08h	11	-	-	-0,06	-0,03
76310000	Rosário do Sul	Novembro/2023	AT_P	27/10/2005 15h	15/11/2023 08h	36	-	-	-0,10	0,11

Código	Nome	Evento	Cenário	Início	Fim	Nº de eventos	M1	M2	J	C
76310000	Rosário do Sul	Novembro/2023	AL_P	15/07/2006 21h	15/11/2023 08h	25	-	-	-0,11	0,10
76310000	Rosário do Sul	Novembro/2023	IN_P	15/07/2006 21h	15/11/2023 08h	11	-	-	-0,42	0.08
76560000	Manoel Viana	Novembro/2023	AT_AT	08/10/2005 10h	19/11/2023 08h	81	-	-	0,36	-0,01
76560000	Manoel Viana	Novembro/2023	AL_AL	04/01/2006 15h	19/11/2023 08h	51	-	-	0,64	-0,01
76560000	Manoel Viana	Novembro/2023	IN_IN	04/01/2006 15h	19/11/2023 08h	35	-	-	0,83	-0,01
76560000	Manoel Viana	Novembro/2023	AT_P	08/10/2005 10h	19/11/2023 08h	81	-	-	0,59	0,04
76560000	Manoel Viana	Novembro/2023	AL_P	04/01/2006 15h	19/11/2023 08h	52	-	-	0,71	0,04
76560000	Manoel Viana	Novembro/2023	IN_P	04/01/2006 15h	19/11/2023 08h	35	-	-	0,77	0,03
76560000	Manoel Viana	Junho e Julho/2025	AT_AT	08/10/2005 10h	17/06/2025 21h	88	-	-	0,45	-0,01
76560000	Manoel Viana	Junho e Julho/2025	AL_AL	04/01/2006 15h	17/06/2025 21h	57	-	-	0,70	-0,01
76560000	Manoel Viana	Junho e Julho/2025	IN_IN	04/01/2006 15h	17/06/2025 21h	37	-	-	0,85	-0,01
76560000	Manoel Viana	Junho e Julho/2025	AT_P	08/10/2005 10h	17/06/2025 21h	88	-	-	0,69	0,04
76560000	Manoel Viana	Junho e Julho/2025	AL_P	04/01/2006 15h	17/06/2025 21h	58	-	-	0,80	0,02
76560000	Manoel Viana	Junho e Julho/2025	IN_P	04/01/2006 15h	17/06/2025 21h	37	-	-	0,79	0,02
76750000	Alegrete	Setembro/2023	AT_AT	06/10/2005 11h	05/09/2023 08h	149	-	-	0,21	-0,02
76750000	Alegrete	Setembro/2023	AL_AL	11/10/2005 10h	05/09/2023 08h	117	-	-	0,12	-0,01
76750000	Alegrete	Setembro/2023	IN_IN	11/10/2005 10h	05/09/2023 08h	96	-	-	0,08	-0,01
76750000	Alegrete	Setembro/2023	AT_P	06/10/2005 11h	05/09/2023 08h	149	-	-	0,39	0,08
76750000	Alegrete	Setembro/2023	AL_P	11/10/2005 10h	05/09/2023 08h	120	-	-	0,33	0,08
76750000	Alegrete	Setembro/2023	IN_P	11/10/2005 10h	05/09/2023 08h	96	-	-	0,28	0,07
76750000	Alegrete	Setembro/2023	AT_AT	06/10/2005 11h	23/09/2023 06h	149	-	-	0,23	-0,02
76750000	Alegrete	Setembro/2023	AL_AL	11/10/2005 10h	23/09/2023 06h	118	-	-	0,14	-0,01
76750000	Alegrete	Setembro/2023	IN_IN	11/10/2005 10h	23/09/2023 06h	97	-	-	0,10	-0,01
76750000	Alegrete	Setembro/2023	AT_P	06/10/2005 11h	23/09/2023 06h	150	-	-	0,42	0,07
76750000	Alegrete	Setembro/2023	AL_P	11/10/2005 10h	23/09/2023 06h	121	-	-	0,38	0,07
76750000	Alegrete	Setembro/2023	IN_P	11/10/2005 10h	23/09/2023 06h	97	-	-	0,35	0,05
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	AT_AT	06/10/2005 11h	16/04/2024 09h	155	-	-	0,24	-0,02
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	AL_AL	11/10/2005 10h	16/04/2024 09h	121	-	-	0,15	-0,01
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	IN_IN	11/10/2005 10h	16/04/2024 09h	99	-	-	0,11	-0,01

Código	Nome	Evento	Cenário	Início	Fim	Nº de eventos	M1	M2	J	C
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	AT_P	06/10/2005 11h	16/04/2024 09h	156	-	-	0,45	0,06
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	AL_P	11/10/2005 10h	16/04/2024 09h	124	-	-	0,40	0,06
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	IN_P	11/10/2005 10h	16/04/2024 09h	99	-	-	0,36	0,05
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	AT_AT	06/10/2005 11h	29/04/2024 21h	156	-	-	0,25	-0,02
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	AL_AL	11/10/2005 10h	29/04/2024 21h	122	-	-	0,16	-0,01
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	IN_IN	11/10/2005 10h	29/04/2024 21h	100	-	-	0,11	-0,01
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	AT_P	06/10/2005 11h	29/04/2024 21h	157	-	-	0,45	0,06
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	AL_P	11/10/2005 10h	29/04/2024 21h	125	-	-	0,40	0,06
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	IN_P	11/10/2005 10h	29/04/2024 21h	100	-	-	0,36	0,05
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	AT_AT	06/10/2005 11h	27/05/2024 06h	157	-	-	0,27	-0,02
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	AL_AL	11/10/2005 10h	27/05/2024 06h	123	-	-	0,19	-0,01
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	IN_IN	11/10/2005 10h	27/05/2024 06h	101	-	-	0,17	-0,01
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	AT_P	06/10/2005 11h	27/05/2024 06h	158	-	-	0,47	0,06
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	AL_P	11/10/2005 10h	27/05/2024 06h	126	-	-	0,43	0,06
76750000	Alegrete	Abril e Maio/2024	IN_P	11/10/2005 10h	27/05/2024 06h	101	-	-	0,42	0,05
76750000	Alegrete	Junho e Julho/2025	AT_AT	06/10/2005 11h	16/06/2025 19h	161	-	-	0,30	-0,01
76750000	Alegrete	Junho e Julho/2025	AL_AL	11/10/2005 10h	16/06/2025 19h	127	-	-	0,22	-0,01
76750000	Alegrete	Junho e Julho/2025	IN_IN	11/10/2005 10h	16/06/2025 19h	102	-	-	0,21	-0,01
76750000	Alegrete	Junho e Julho/2025	AT_P	06/10/2005 11h	16/06/2025 19h	162	-	-	0,49	0,06
76750000	Alegrete	Junho e Julho/2025	AL_P	11/10/2005 10h	16/06/2025 19h	130	-	-	0,46	0,06
76750000	Alegrete	Junho e Julho/2025	IN_P	11/10/2005 10h	16/06/2025 19h	102	-	-	0,45	0,05
77150000	Uruguaiana	Abril e Maio/2024	AT_AT	04/09/2011 07h	18/04/2024 09h	68	0,55	-	0,11	-0,01
77150000	Uruguaiana	Abril e Maio/2024	AL_AL	16/09/2011 17h	18/04/2024 09h	37	0,47	-	0,44	-0,01
77150000	Uruguaiana	Abril e Maio/2024	IN_IN	26/12/2012 17h	18/04/2024 09h	22	0,46	-	0,44	0,00
77150000	Uruguaiana	Abril e Maio/2024	AT_P	04/09/2011 07h	18/04/2024 09h	70	0,42	-	0,31	0,02
77150000	Uruguaiana	Abril e Maio/2024	AL_P	16/09/2011 17h	18/04/2024 09h	39	0,46	-	0,35	0,02
77150000	Uruguaiana	Abril e Maio/2024	IN_P	26/12/2012 17h	18/04/2024 09h	23	0,46	-	0,37	0,02
77150000	Uruguaiana	Abril e Maio/2024	AT_AT	04/09/2011 07h	02/05/2024 15h	68	0,55	-	0,11	-0,01
77150000	Uruguaiana	Abril e Maio/2024	AL_AL	16/09/2011 17h	02/05/2024 15h	38	0,47	-	0,44	-0,01

Código	Nome	Evento	Cenário	Início	Fim	Nº de eventos	M1	M2	J	C
77150000	Uruguaiana	Abril e Maio/2024	IN_IN	26/12/2012 17h	02/05/2024 15h	22	0,46	-	0,44	0,00
77150000	Uruguaiana	Abril e Maio/2024	AT_P	04/09/2011 07h	02/05/2024 15h	70	0,42	-	0,33	0,02
77150000	Uruguaiana	Abril e Maio/2024	AL_P	16/09/2011 17h	02/05/2024 15h	40	0,46	-	0,35	0,02
77150000	Uruguaiana	Abril e Maio/2024	IN_P	26/12/2012 17h	02/05/2024 15h	23	0,46	-	0,37	0,02
77150000	Uruguaiana	Junho e Julho/2025	AT_AT	04/09/2011 07h	18/06/2025 14h	73	0,55	-	0,14	-0,01
77150000	Uruguaiana	Junho e Julho/2025	AL_AL	16/09/2011 17h	18/06/2025 14h	41	0,47	-	0,44	-0,01
77150000	Uruguaiana	Junho e Julho/2025	IN_IN	26/12/2012 17h	18/06/2025 14h	24	0,46	-	0,44	0,00
77150000	Uruguaiana	Junho e Julho/2025	AT_P	04/09/2011 07h	18/06/2025 14h	75	0,43	-	0,33	0,02
77150000	Uruguaiana	Junho e Julho/2025	AL_P	16/09/2011 17h	18/06/2025 14h	43	0,46	-	0,36	0,01
77150000	Uruguaiana	Junho e Julho/2025	IN_P	26/12/2012 17h	18/06/2025 14h	25	0,46	-	0,38	0,01

Tabela 4.7. Métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Uruguai – parte 1.

Cenário	Código	75780000	75900000		76310000		76560000			77150000	
	Nome	Passo São Borja	Itaqui		Rosário do Sul		Manoel Viana			Uruguaiana	
	Início do evento	06/09/23 03h	19/04/24 20h	03/05/24 13h	24/09/2023 12h	15/11/2023 17h	19/11/23 21h	18/06/25 10h	19/04/24 20h	04/05/24 02h	20/06/25 01h
	Fim do evento	16/09/23 13h	23/04/24 14h	31/05/24 16h	25/09/2023 20h	19/11/2023 21h	24/11/23 15h	29/06/25 04h	28/04/24 08h	02/06/24 20h	10/07/25 14h
AT_AT		0,05	0,13	0,15	0.07	0,12	0,06	0,14	0,05	0,06	0,06
AL_AL		0,05	0,12	0,16	0,07	0,13	0,04	0,07	**0,02**	**0,02**	**0,04**
IN_IN		**0,04**	0,09	0,14	0,08	**0,11**	**0,02**	**0,04**	**0,02**	**0,02**	**0,04**
AT_P	EMA (m)	0,08	**0,05**	0,05	**0,06**	0,16	0,06	0,1	0,04	0,05	0,06
AL_P		0,14	**0,05**	**0,03**	**0,06**	0,15	0,05	0,07	0,03	0,04	0,05
IN_P		0,2	0,06	0,04	0,03	0,18	0,04	0,07	0,03	0,03	0,05
Benchmark		0,16	0,12	0,26	0,16	0,24	0,11	0,27	0,14	0,26	0,28
AT_AT		0,05	0,17	0,23	0,07	0,17	0,08	0,18	0,07	0,11	0,08
AL_AL		0,06	0,18	0,26	0,07	0,19	0,04	0,1	0,03	**0,02**	**0,05**
IN_IN		**0,04**	0,14	0,25	0,08	0,19	0,03	**0,06**	0,03	**0,02**	**0,05**
AT_P	EMA (até o pico)	**0,04**	**0,02**	0,06	0,06	**0,1**	**0,02**	0,08	**0,01**	0,06	**0,05**
AL_P		0,07	0,03	**0,04**	0,06	**0,1**	**0,02**	0,07	0,02	0,03	**0,05**
IN_P		0,1	0,03	**0,04**	**0,03**	0,15	**0,02**	0,07	0,02	0,03	**0,05**
Benchmark		0,12	0,18	0,5	0,16	0,35	0,12	0,36	0,22	0,48	0,38
AT_AT		**-0,24**	-1,8	**0,02**	-1,11	**-0,42**	-0,1	-0,05	-0,18	-0,13	-0,03
AL_AL		-0,27	-1,56	0,04	-1,22	-0,48	**-0,02**	**0**	**0,15**	**-0,02**	**0,16**
IN_IN		-0,06	-1,01	-0,03	-1,41	-0,73	0,03	0,02	0,21	0,03	0,2
AT_P	EMR (%)	0,81	**0,03**	0,21	0,99	1,46	0,54	0,37	0,39	0,2	0,3
AL_P		1,46	0,28	0,14	0,94	1,34	0,47	0,29	0,35	0,19	0,31
IN_P		2,13	0,39	0,25	**0,24**	0,9	0,39	0,3	0,35	0,19	0,32
Benchmark		0,55	-0,55	-0,32	-2,68	-0,89	-0,08	-0,05	-0,41	-0,12	-0,2
AT_AT		-0,34	-2,32	-2,16	-1,11	-2,59	-0,84	-1,53	-0,89	-1,1	-0,71
AL_AL		-0,42	-2,34	-2,5	-1,22	-2,87	-0,46	-0,76	0,14	-0,08	0,14
IN_IN		**-0,24**	-1,88	-2,43	-1,41	-2,84	-0,19	-0,31	0,18	**-0,07**	0,15
AT_P	EMR (até o pico) (%)	0,37	**0**	-0,43	0,99	**-0,74**	**0,06**	-0,43	**-0,08**	-0,55	-0,21
AL_P		0,74	0,36	-0,15	0,94	-0,88	0,12	**-0,21**	**0,08**	-0,27	**0,04**
IN_P		1,08	0,46	**-0,08**	**0,24**	-1,98	0,1	-0,22	0,13	-0,22	0,07
Benchmark		-0,77	-2,41	-4,84	-2,68	-5,31	-1,33	-3,01	-2,75	-4,71	-3,85

Cenário	Código	75780000	75900000		76310000		76560000		77150000		
	Nome	Passo São Borja	Itaqui		Rosário do Sul		Manoel Viana		Uruguaiana		
	Início do evento	06/09/23 03h	19/04/24 20h	03/05/24 13h	24/09/2023 12h	15/11/2023 17h	19/11/23 21h	18/06/25 10h	19/04/24 20h	04/05/24 02h	20/06/25 01h
	Fim do evento	16/09/23 13h	23/04/24 14h	31/05/24 16h	25/09/2023 20h	19/11/2023 21h	24/11/23 15h	29/06/25 04h	28/04/24 08h	02/06/24 20h	10/07/25 14h
AT_AT	Diferença no pico (m)	0,02	0,14	0,23	**0,04**	**0,01**	**-0,01**	**0**	0,06	0,05	0,02
AL_AL		**0,01**	0,12	0,19	**0,04**	0,02	-0,02	-0,01	0,03	**-0,01**	**0**
IN_IN		**-0,01**	0,07	0,12	0,06	0,03	-0,03	-0,02	0,02	-0,02	-0,01
AT_P		-0,06	**-0,03**	0,03	-0,09	-0,11	-0,07	-0,06	**0**	**-0,01**	-0,02
AL_P		-0,13	-0,05	**-0,02**	-0,09	-0,1	-0,07	-0,05	0,01	-0,02	-0,02
IN_P		-0,18	-0,06	**-0,02**	-0,05	-0,08	-0,07	-0,05	0,01	-0,02	-0,02
Benchmark		-0,13	-0,02	0,03	0,1	0,01	-0,04	-0,02	0,06	0,05	0,02
AT_AT	Deslocamento do pico (h)	**0**	**0**	15	**0**	**4**	**6**	**6**	**17**	17	**17**
AL_AL		**0**	15	15	**0**	**4**	**6**	**6**	**17**	**0**	**17**
IN_IN		**0**	15	15	**0**	**4**	**6**	**6**	**17**	**0**	**17**
AT_P		**0**	**0**	**0**	**0**	**4**	**6**	**6**	**17**	17	**17**
AL_P		**0**	**0**	**0**	**0**	4	**6**	**6**	**17**	**0**	**17**
IN_P		**0**	**0**	**0**	**0**	8	**6**	**6**	**17**	**0**	**17**
Benchmark		10	15	15	0	8	12	12	34	34	34

Tabela 4.8. Métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Uruguai – parte 2.

Cenário	Código		76750000				
	Nome		Alegrete				
	Início do evento	05/09/23 17h	23/09/23 15h	16/04/24 18h	30/04/24 06h	27/05/24 15h	17/06/25 04h
	Fim do evento	19/09/23 17h	02/10/23 03h	22/04/24 02h	08/05/24 10h	28/05/24 07h	26/06/25 00h
AT_AT	EMA (m)	**0,07**	**0,07**	**0,07**	0,13	**0,02**	0,11
AL_AL		0,08	**0,07**	0,08	0,14	**0,02**	0,12
IN_IN		0,08	**0,07**	0,08	0,15	**0,02**	0,12
AT_P		0,09	0,08	0,08	**0,12**	0,06	**0,1**
AL_P		0,09	**0,07**	0,08	**0,12**	0,06	**0,1**
IN_P		0,09	**0,07**	0,08	0,13	0,05	**0,1**
Benchmark		0,1	0,09	0,1	0,18	0,02	0,19
AT_AT	EMA (até o pico)	0,07	0,07	**0,1**	0,19	0,03	0,14
AL_AL		0,08	0,07	0,11	0,21	**0,02**	0,16
IN_IN		0,08	0,07	0,12	0,23	0,03	0,16
AT_P		0,07	**0,04**	0,03	**0,08**	0,05	**0,07**
AL_P		0,07	**0,04**	0,04	0,09	0,05	**0,07**
IN_P		**0,06**	**0,04**	0,04	0,11	0,04	0,08
Benchmark		0,09	0,08	0,11	0,23	0,02	0,25
AT_AT	EMR (%)	-0,19	-0,18	-0,23	-0,18	-0,2	**-0,24**
AL_AL		**-0,17**	**-0,15**	**-0,21**	**-0,17**	**-0,18**	-0,25
IN_IN		-0,18	-0,17	-0,24	-0,2	-0,2	-0,27
AT_P		0,74	0,74	0,64	0,55	0,71	0,49
AL_P		0,73	0,69	0,61	0,52	0,69	0,46
IN_P		0,64	0,56	0,52	0,44	0,58	0,38
Benchmark		-0,03	0,04	0,02	0,07	-0,04	-0,21
AT_AT	EMR (até o pico) (%)	-0,58	-0,68	-1,1	-1,73	-0,31	-1,29
AL_AL		-0,59	-0,7	-1,2	-1,91	**-0,29**	-1,42
IN_IN		-0,63	-0,75	-1,28	-2,04	-0,32	-1,46
AT_P		0,44	0,37	**0,02**	**-0,55**	0,62	**-0,25**
AL_P		0,41	0,29	-0,07	-0,69	0,59	-0,33
IN_P		**0,29**	**0,15**	-0,21	-0,86	0,48	-0,43
Benchmark		-0,59	-0,67	-1,17	-2,04	-0,19	-1,93
AT_AT	Diferença no pico (m)	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,01**
AL_AL		**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,01**
IN_IN		**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,01**
AT_P		-0,09	-0,08	-0,07	-0,07	-0,07	-0,07
AL_P		-0,09	-0,07	-0,07	-0,07	-0,07	-0,06
IN_P		-0,08	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06
Benchmark		-0,01	-0,02	-0,03	-0,03	-0,01	-0,01
AT_AT	Deslocamento do pico (h)	**4**	**4**	4	**4**	**4**	**4**
AL_AL		**4**	**4**	4	**4**	**4**	**4**
IN_IN		**4**	**4**	4	**4**	**4**	**4**
AT_P		**4**	-4	**0**	**4**	**4**	**4**
AL_P		**4**	-4	**0**	**4**	**4**	**4**
IN_P		**4**	-4	**0**	**4**	**4**	**4**
Benchmark		8	0	4	8	8	8

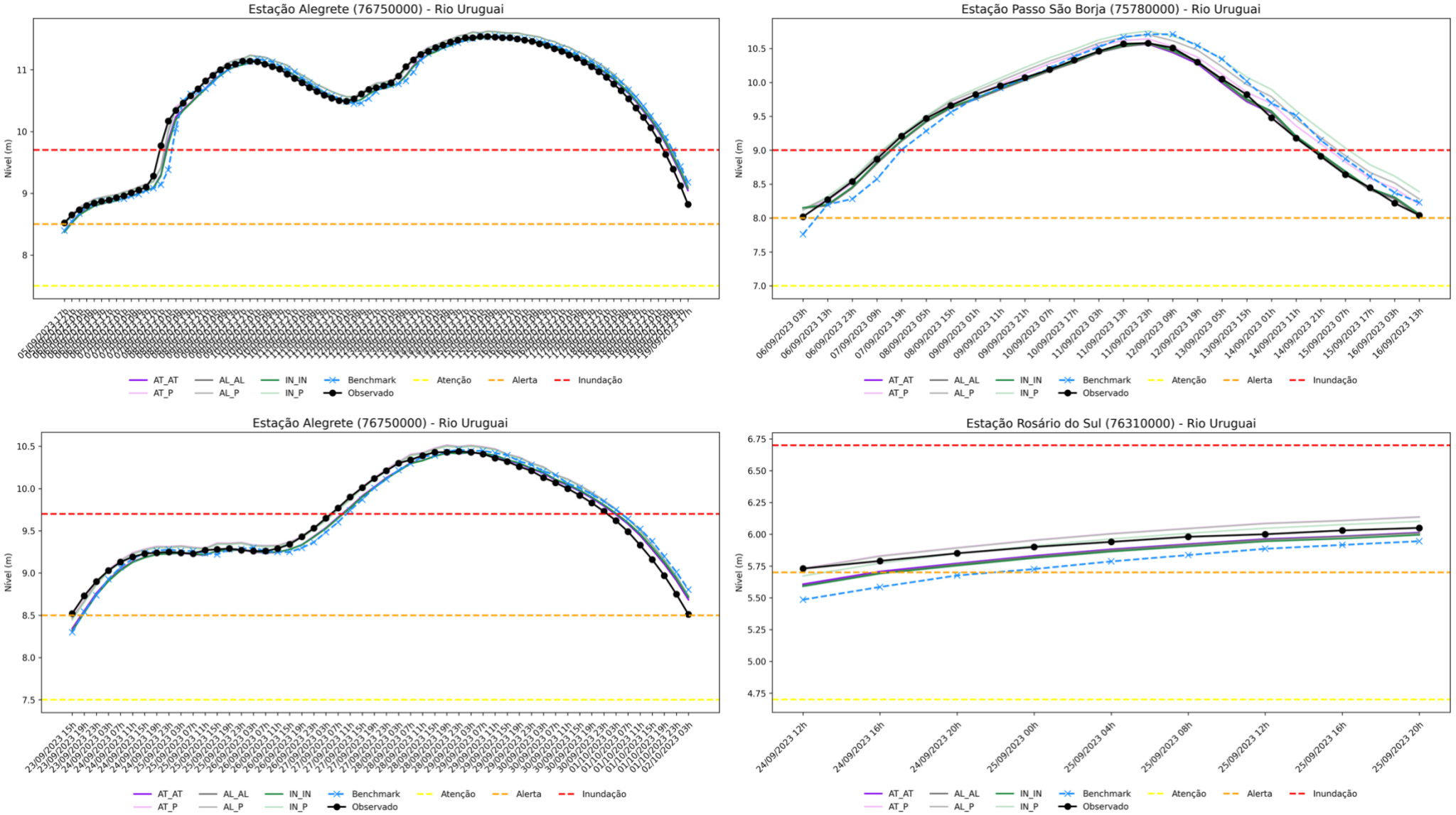

Figura 4.9. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Uruguai – parte 1.

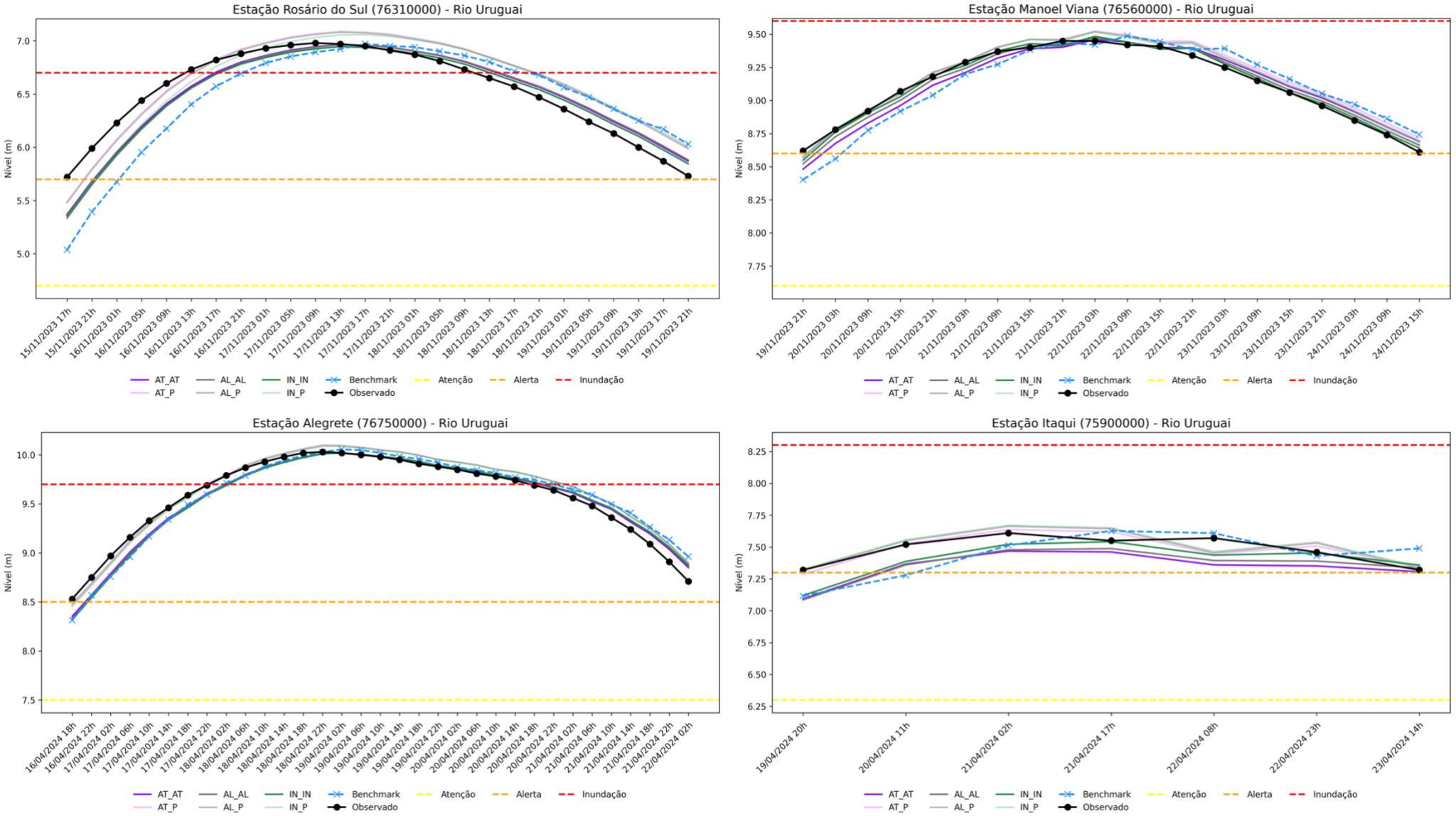

Figura 4.10. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Uruguai – parte 2.

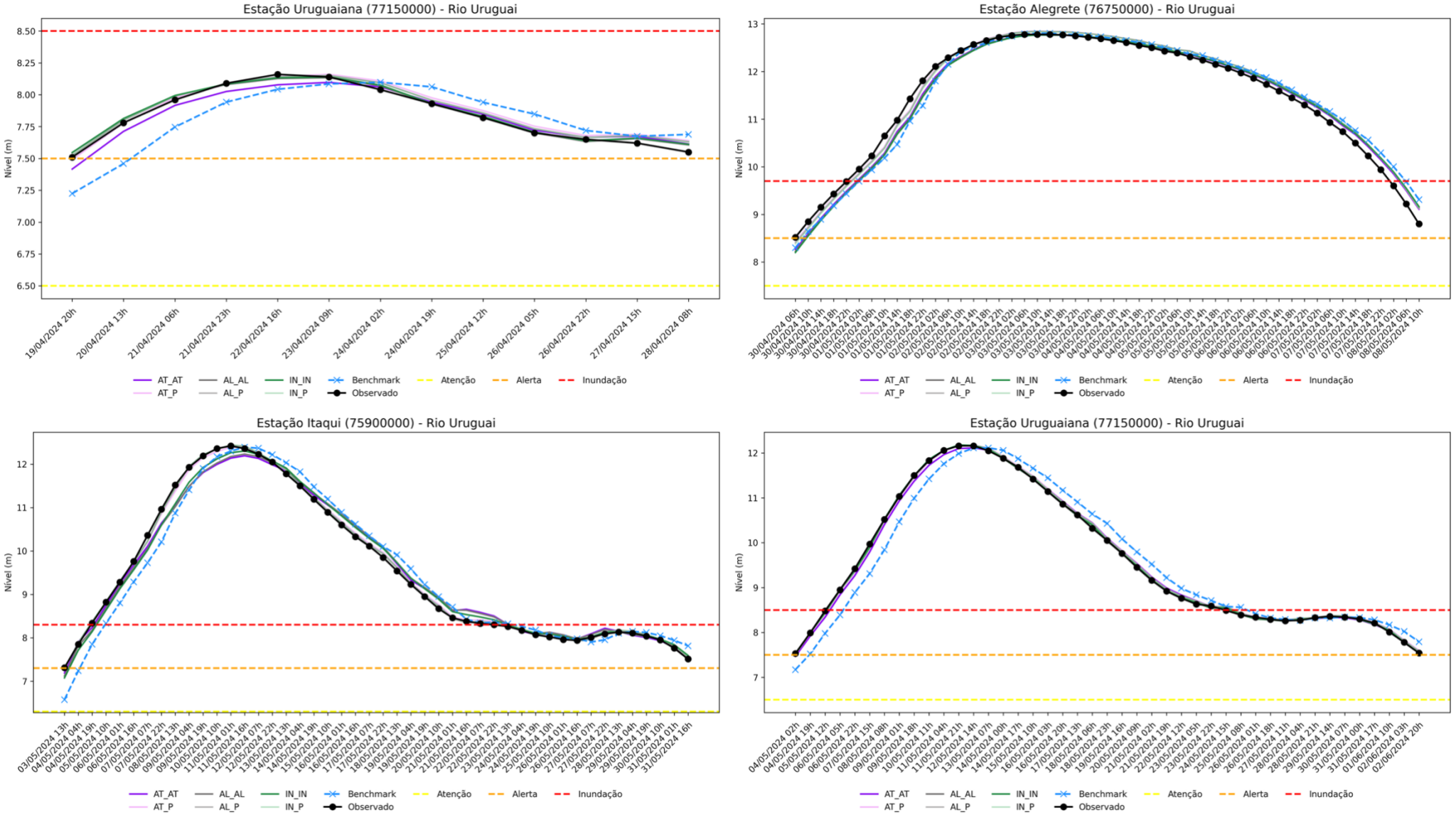

Figura 4.11. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Uruguai – parte 3.

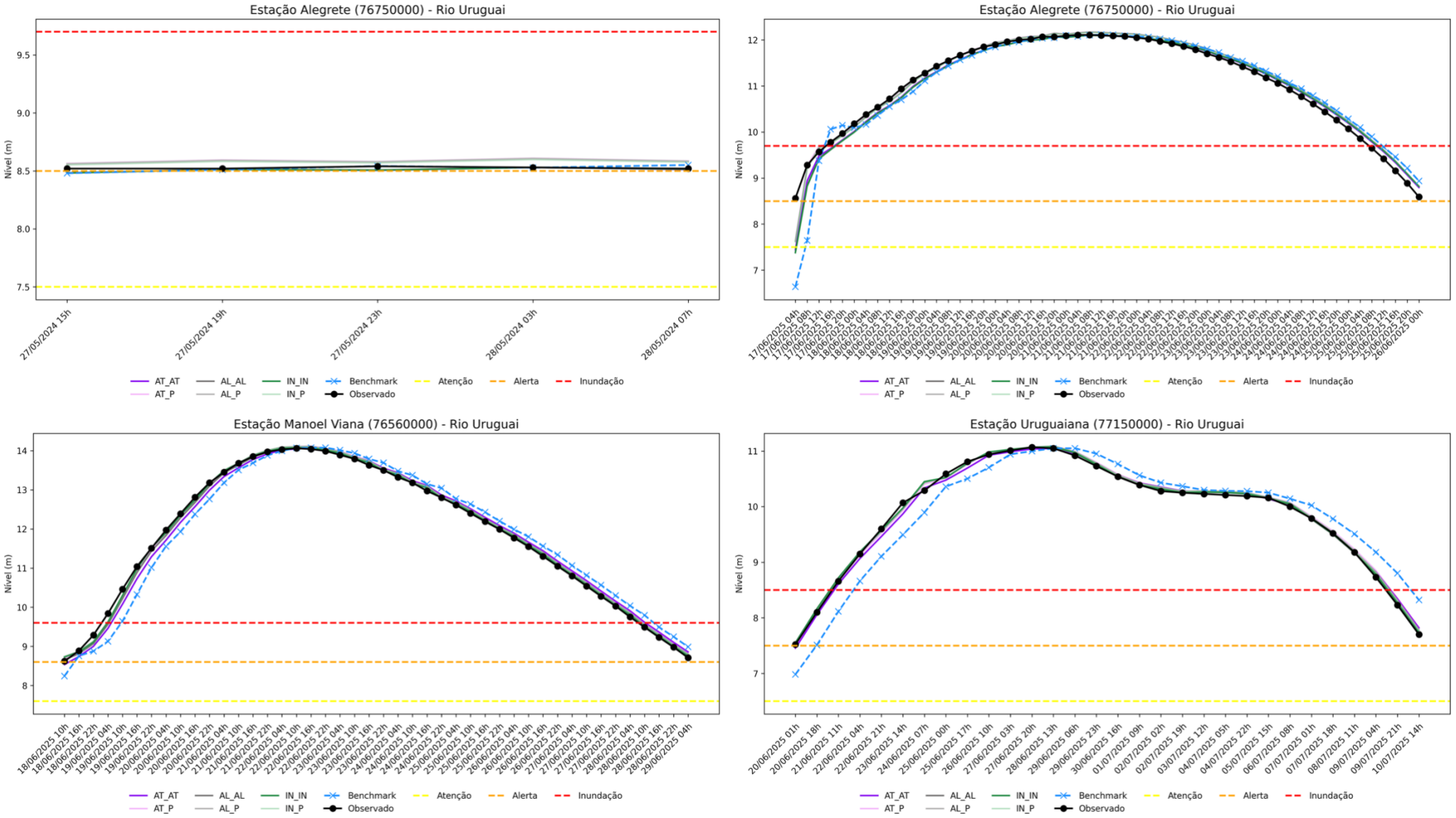

Figura 4.12. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio Uruguai – parte 3.

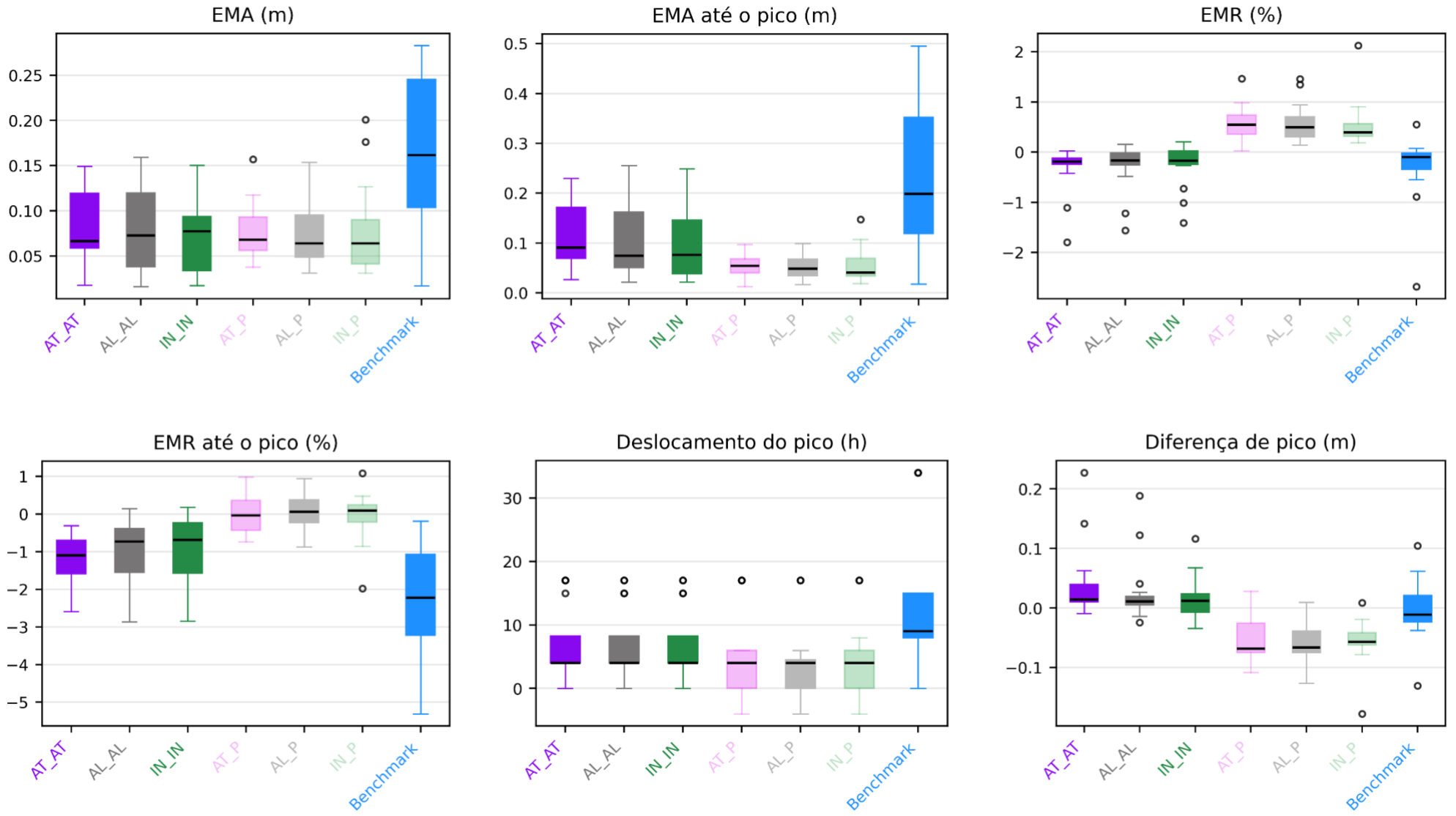

Figura 4.13. *Boxplots* com as métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Uruguai.

4.1.4 Bacia do rio Jacuí

Em função da limitada disponibilidade de dados, a bacia do rio Jacuí contou com apenas um evento de previsão, referente a setembro de 2023 (Tabela 4.9). Considerando o reduzido número de eventos disponíveis para validação, aliado à quantidade limitada de eventos utilizados no processo de calibração, evidencia-se a necessidade de avaliar o desempenho da estação em um conjunto mais amplo de eventos antes de sua utilização em aplicações operacionais ou oficiais. A Tabela 4.10 mostra os resultados das métricas por evento e a Figura 4.14 mostra os gráficos das previsões. Observa-se que as previsões conseguiram representar bem o evento, e os cenários se complementaram, ganhando destaques individuais ao longo do evento. Destaca-se negativamente o cenário AL_P que acabou superestimando e deslocando os níveis após o pico.

Tabela 4.9. Informações sobre a calibração dos modelos empíricos da bacia do rio Jacuí.

Código	Nome	Evento	Cenário	Início	Fim	Nº de eventos	J	C
85900000	Rio Pardo	Setembro/2023	AT_AT	03/09/2018 13h	10/09/2023 02h	10	0,8	-0,1
85900000	Rio Pardo	Setembro/2023	AL_AL	02/11/2019 16h	10/09/2023 02h	1	0,8	-0,1
85900000	Rio Pardo	Setembro/2023	IN_IN	16/09/2023 02h	10/09/2023 02h	-	0,1	0,1
85900000	Rio Pardo	Setembro/2023	AT_P	03/09/2018 13h	10/09/2023 02h	10	0,4	0,1
85900000	Rio Pardo	Setembro/2023	AL_P	02/11/2019 16h	10/09/2023 02h	1	-1,0	0,7
85900000	Rio Pardo	Setembro/2023	IN_P	16/09/2023 02h	10/09/2023 02h	-	0,1	0,1

Tabela 4.10. Métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio Jacuí.

Cenário		
	Código	85900000
	Nome	Rio Pardo
	Início do evento	12/09/2023 03h
	Fim do evento	30/09/2023 03h
AT_AT	EMA (m)	**0,18**
AL_AL		0,17
IN_IN		0,36
AT_P		0,29
AL_P		0,86
IN_P		0,36
Benchmark		-
AT_AT	EMA (até o pico)	0,26
AL_AL		**0,22**
IN_IN		0,39
AT_P		0,26
AL_P		0,42
IN_P		0,39
Benchmark		-
AT_AT	EMR (%)	-0,94

Cenário		
	Código	85900000
	Nome	Rio Pardo
	Início do evento	12/09/2023 03h
	Fim do evento	30/09/2023 03h
AL_AL		-0,37
IN_IN		0,61
AT_P		**0,9**
AL_P		5,2
IN_P		0,61
Benchmark		-
AT_AT		-1,83
AL_AL		**-1,25**
IN_IN		-3,28
AT_P	EMR (até o pico) (%)	-1,87
AL_P		-3,57
IN_P		-3,28
Benchmark		-
AT_AT		-0,16
AL_AL		-0,23
IN_IN		-0,12
AT_P	Diferença no pico (m)	-0,18
AL_P		-0,71
IN_P		**-0,12**
Benchmark		-
AT_AT		**0**
AL_AL		**0**
IN_IN		24
AT_P	Deslocamento do pico (h)	24
AL_P		48
IN_P		24
Benchmark		-

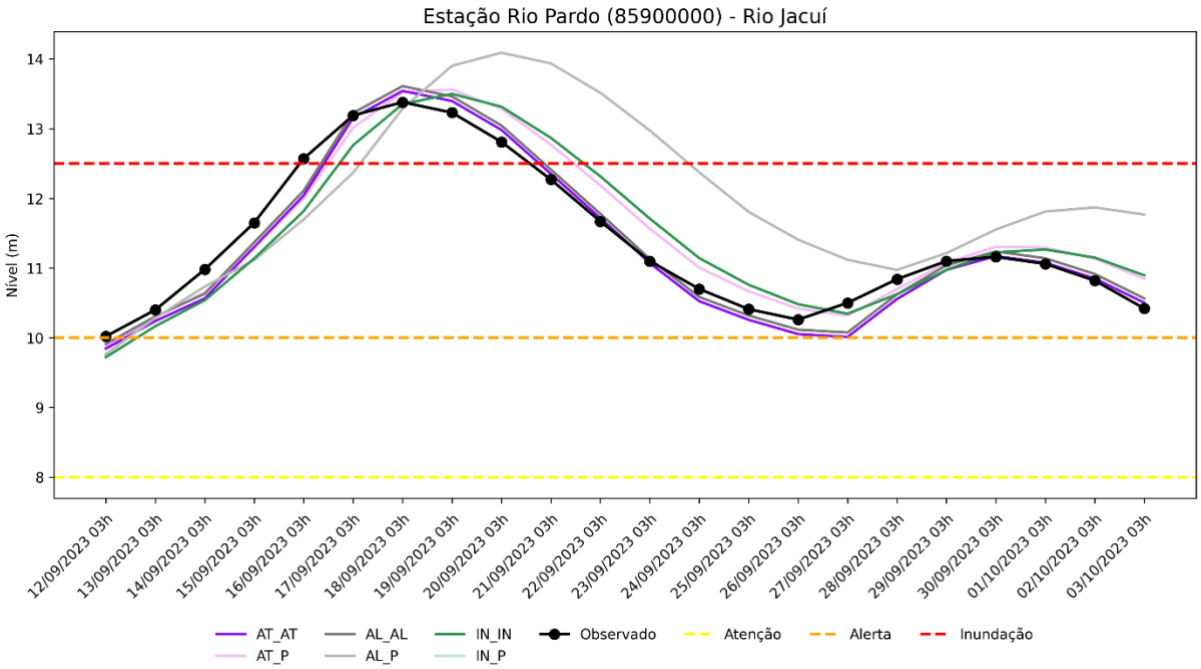

Figura 4.14. Previsão realizada com o modelo empírico na bacia do rio Jacuí.

4.1.5 Bacia do rio dos Sinos

A bacia do rio dos Sinos não conta com nenhum SAH ativo, e experimentalmente foram geradas previsões para a estação São Leopoldo (87382000), cujos eventos de abril e maio de 2024 e de junho e julho de 2025 foram medidos pelas estações telemétricas (Tabela 4.11). A Tabela 4.12 mostra os resultados das métricas por evento, a Figura 4.15 mostra os gráficos das previsões e a Figura 4.16 mostra os *boxplots* com os resultados das métricas para toda a bacia.

Os valores de EMA apresentaram comportamento muito semelhante entre os cenários avaliados, tanto na análise do evento completo quanto na análise até o pico, com magnitudes próximas de zero em ambos os casos. De forma análoga, o EMR manteve-se próximo de zero nos cenários delimitados de limiar a limiar. Na análise do EMR até o pico, apenas o cenário IN_P apresentou viés positivo, enquanto, de maneira geral, todos os cenários exibiram baixa variabilidade, com medianas situadas aproximadamente no intervalo de −2% a 2%.

Em relação ao deslocamento do pico, apenas os cenários AL_P e IN_P apresentaram adiantamentos mais expressivos, ao passo que, nos demais cenários, a mediana do deslocamento concentrou-se em torno de 6 horas. Por fim, a análise da diferença de pico indicou baixos erros para todos os cenários avaliados, com destaque para os cenários AT_AT e AL_AL, que apresentaram maior acurácia na estimativa do valor máximo observado.

Tabela 4.11. Informações sobre a calibração dos modelos empíricos da bacia do rio dos Sinos.

Código	Nome	Evento	Cenário	Início	Fim	Nº de eventos	M1	J	C
87382000	Rio dos Sinos	Abril e Maio/2024	AT_AT	01/08/2018 14h	29/04/2024 08h	25	0,16	0,47	0,00
87382000	Rio dos Sinos	Abril e Maio/2024	AL_AL	01/09/2018 18h	29/04/2024 08h	12	0,20	0,40	0,00
87382000	Rio dos Sinos	Abril e Maio/2024	IN_IN	04/09/2018 15h	29/04/2024 08h	7	0,40	0,57	-0,01
87382000	Rio dos Sinos	Abril e Maio/2024	AT_P	01/08/2018 14h	29/04/2024 08h	25	0,06	0,65	0,02
87382000	Rio dos Sinos	Abril e Maio/2024	AL_P	01/09/2018 18h	29/04/2024 08h	12	0,12	0,69	0,01
87382000	Rio dos Sinos	Abril e Maio/2024	IN_P	04/09/2018 15h	29/04/2024 08h	7	0,46	0,82	-0,01
87382000	Rio dos Sinos	Junho e Julho/2025	AT_AT	01/08/2018 14h	18/06/2025 08h	29	0,12	0,62	-0,01
87382000	Rio dos Sinos	Junho e Julho/2025	AL_AL	01/09/2018 18h	18/06/2025 08h	14	0,14	0,60	-0,01
87382000	Rio dos Sinos	Junho e Julho/2025	IN_IN	04/09/2018 15h	18/06/2025 08h	9	0,35	0,66	-0,01
87382000	Rio dos Sinos	Junho e Julho/2025	AT_P	01/08/2018 14h	18/06/2025 08h	29	0,06	0,75	0,01
87382000	Rio dos Sinos	Junho e Julho/2025	AL_P	01/09/2018 18h	18/06/2025 08h	14	0,13	0,76	0,01
87382000	Rio dos Sinos	Junho e Julho/2025	IN_P	04/09/2018 15h	18/06/2025 08h	9	0,43	0,72	0,01

Tabela 4.12. Métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio dos Sinos.

Cenário	**Código**	87382000	87382000
	Nome	Rio dos Sinos	Rio dos Sinos
	Início do evento	30/04/2024 09h	19/06/2025 09h
	Fim do evento	05/06/2024 09h	06/07/2025 21h
AT_AT	EMA (m)	0,08	**0,03**
AL_AL		0,09	**0,03**
IN_IN		**0,06**	0,04
AT_P		0,08	0,04
AL_P		0,07	**0,03**
IN_P		0,08	0,05
Benchmark		-	-
AT_AT	EMA (até o pico)	0,24	0,04
AL_AL		0,25	0,04
IN_IN		**0,18**	0,06
AT_P		0,2	0,04
AL_P		**0,18**	0,04
IN_P		0,2	**0,09**
Benchmark		-	-
AT_AT	EMR (%)	**-0,03**	0,01
AL_AL		-0,04	**0**
IN_IN		-0,09	0,09
AT_P		0,38	0,46
AL_P		0,28	0,41
IN_P		-0,13	0,55
Benchmark		-	-
AT_AT	EMR (até o pico) (%)	-3,43	-0,43
AL_AL		-3,81	-0,42
IN_IN		-1,26	0,8
AT_P		-2,1	**0,23**
AL_P		-1,4	0,57
IN_P		**1,29**	1,82
Benchmark		-	-
AT_AT	Diferença no pico (m)	-0,13	0
AL_AL		**-0,09**	0
IN_IN		-0,25	0,02

Cenário			
	Código	87382000	87382000
	Nome	Rio dos Sinos	Rio dos Sinos
	Início do evento	30/04/2024 09h	19/06/2025 09h
	Fim do evento	05/06/2024 09h	06/07/2025 21h
AT_P		-0,24	-0,02
AL_P		-0,29	-0,02
IN_P		-0,42	**-0,01**
Benchmark		-	-
AT_AT		**0**	**12**
AL_AL		**0**	**12**
IN_IN		**0**	**12**
AT_P	Deslocamento do pico (h)	**0**	**12**
AL_P		**0**	-24
IN_P		**0**	-24
Benchmark		-	-

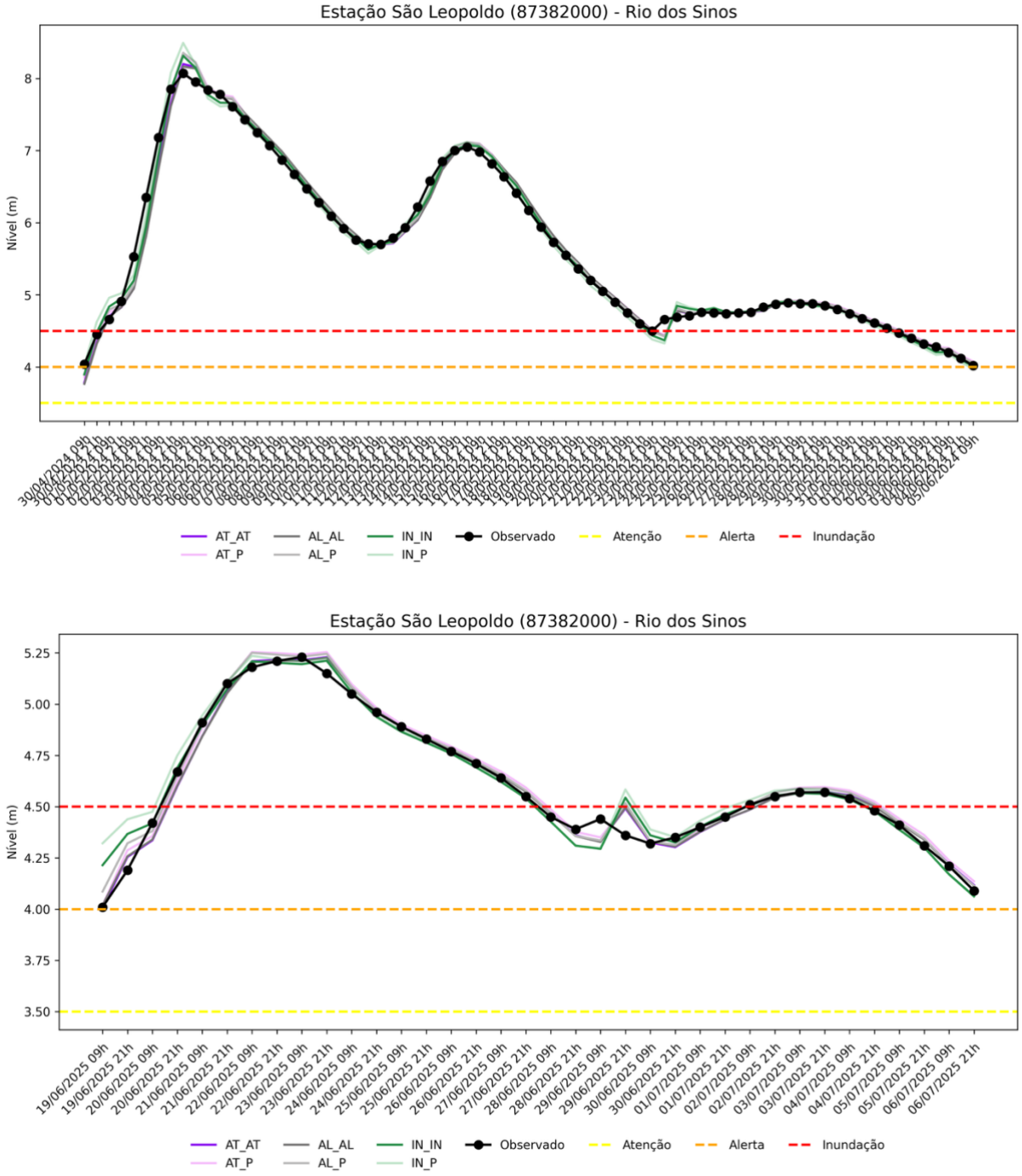

Figura 4.15. Previsões realizadas com os modelos empíricos na bacia do rio dos Sinos.

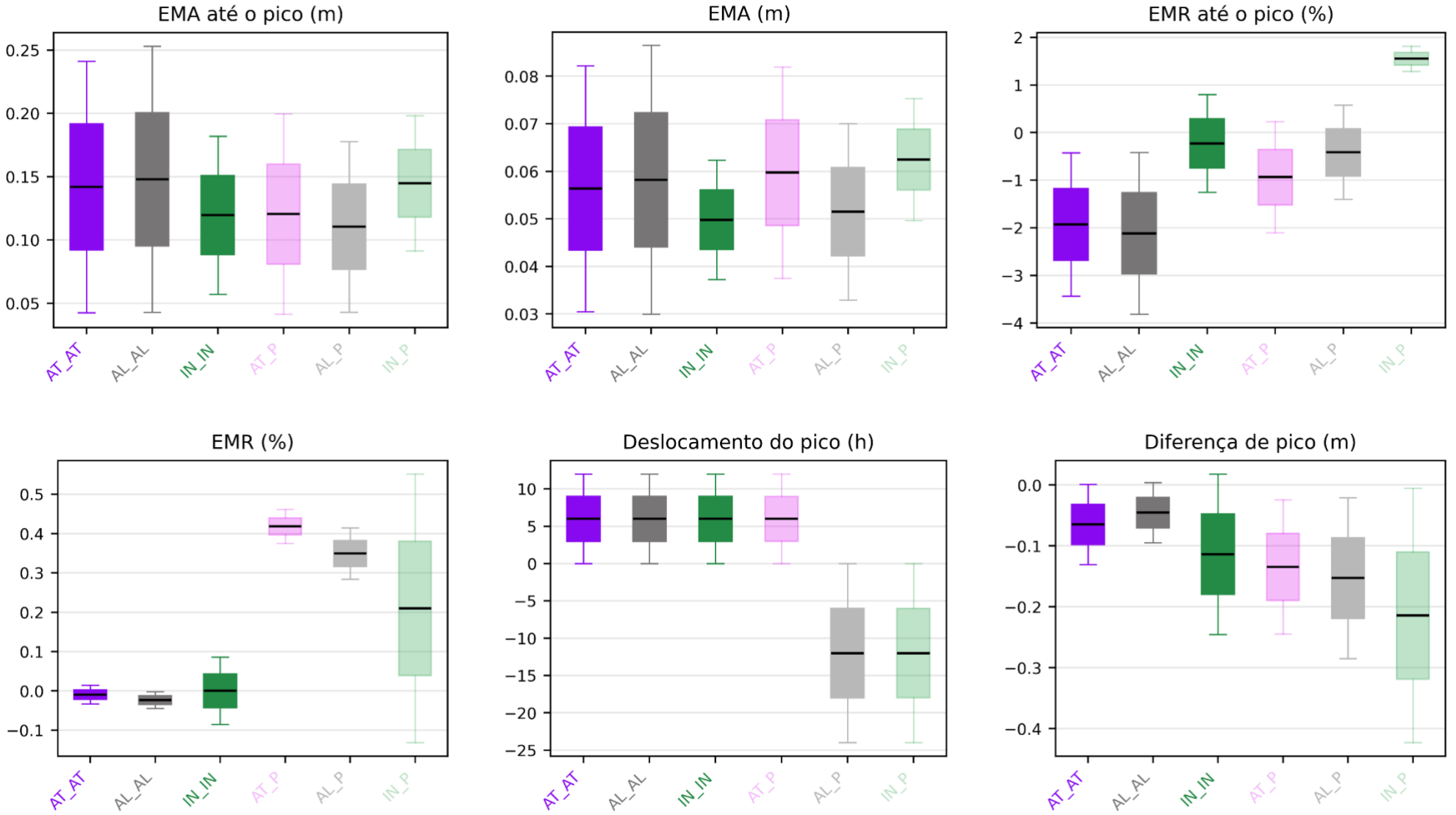

Figura 4.16. Boxplots com as métricas para os eventos de validação dos modelos empíricos na bacia do rio dos Sinos.

4.1.6 Considerações gerais sobre os modelos empíricos

A análise aprofundada dos modelos empíricos em cada bacia possibilitou identificar que os cenários desempenham papéis diferentes em cada bacia. Por exemplo, na bacia do rio Uruguai observou-se que eles apresentam baixa dispersão entre si, já na bacia do rio Caí essa dispersão é maior. Na bacia do rio Taquari os cenários parecem complementar-se em diferentes fases dos eventos.

Avaliando as bacias entre si (Figura 4.17) observa-se que os modelos das bacias dos rios Taquari e Caí tendem a apresentar erros mais altos em comparação com as outras bacias. O EMR mostra uma tendência de superestimativa pelos cenários até o pico, enquanto os cenários que vão de limiar a limiar tendem a apresentar uma subestimativa das previsões. Essa informação pode subsidiar a tomada de decisão operacional, ao fornecer uma faixa de incerteza associada tanto à superestimativa quanto à subestimativa das previsões, a qual, combinada com o conhecimento do hidrólogo operador, contribui para uma avaliação mais robusta do risco hidrológico.

O EMR até o pico com viés negativo em quase todos os cenários de todas as bacias ressalta a dificuldade dos modelos em representar bem a subida do hidrograma, subestimando os valores observados em muitas previsões.

No deslocamento de pico destaca-se o bom desempenho dos modelos em acertar o horário do pico na bacia do rio Taquari, e na diferença de pico destaca-se a bacia do rio Uruguai com erros próximos a zero. Além disso, a proximidade dos resultados dos cenários em relação ao benchmark indica convergência entre as abordagens, sugerindo que os modelos empíricos calibrados foram capazes de capturar de forma consistente a dinâmica representada pela referência adotada.

Com essa perspectiva, é possível relacionar o desempenho das previsões com o comportamento hidrológico de cada bacia. As bacias dos rios Taquari e Caí apresentam resposta hidrológica mais rápida e maior variabilidade dos níveis, o que dificulta a representação dessas oscilações pelos modelos. Nesses sistemas, a propagação dos escoamentos ocorre de forma mais ágil, e, durante eventos extremos, pode haver extravasamento da calha e escoamento em planície de inundação, alterando a relação cota-vazão e impactando a qualidade das previsões.

Na bacia do rio Caí, o uso de estações localizadas em afluentes também contribui para o aumento da dispersão das previsões, uma vez que essas contribuições podem não representar diretamente o comportamento do rio principal no ponto de interesse.

Por outro lado, as bacias dos rios Uruguai, Sinos e Jacuí apresentam resposta mais lenta e variações mais graduais dos níveis, o que favorece maior estabilidade nas previsões. Esse comportamento facilita a representação das tendências pelos modelos, resultando em menor dispersão e maior convergência entre os cenários simulados.

Para cada bacia também foi aplicada a métrica CRPS, com o objetivo de investigar a habilidade do uso de todos os cenários dos modelos empíricos na forma de uma previsão probabilística. Dessa forma, as previsões determinísticas individuais de cada cenário podem ser vistas como uma previsão por conjunto (*ensemble*), probabilística. A Tabela 4.13 mostra os resultados do cálculo do CRPS, que avalia, para cada bacia, o CRPS por ensemble, o CRPS da média do ensemble e o EMA para cada cenário. O valor ótimo do CRPS é zero, sendo assim, quanto mais próximo de zero, mais habilidade, e quanto mais longe de zero, menor a habilidade. Lembrando que o CRPS para revisões determinísticas corresponde ao EMA.

Tabela 4.13. CRPS e EMA médios por bacia.

Métricas	**EMA**						**CRPS**	
Bacias	**AL_AL**	**AT_AT**	**IN_IN**	**AT_P**	**AL_P**	**IN_P**	**Ensemble**	**Média ensemble**
Caí	0,46	0,46	0,52	0,66	0,86	1,09	**0,43**	0,62
Jacuí	**0,22**	0,26	0,39	0,26	0,42	0,39	**0,22**	0,34
Taquari	0,43	0,41	0,50	0,51	0,59	0,63	**0,40**	0,48
Uruguai	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	**0,05**	0,07
Sinos	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,06	**0,04**	0,05

Observa-se que em todas as bacias o CRPS do ensemble foi mais próximo de zero, em comparação com o EMA de cada um dos cenários e a média do ensemble. Na bacia do rio Jacuí o cenário AL_AL obteve o mesmo valor do ensemble, porém é importante salientar que essa bacia apresenta somente um evento de validação testado.

Estes resultados indicam que o uso das previsões determinísticas na forma de previsão probabilística por conjunto apresentou menores erros. Ou seja, o uso do ensemble, ao representar uma faixa de valores possíveis, é capaz de descrever melhor o evento observado do que a utilização de uma única previsão determinística.

Sob uma perspectiva mais ampla, este resultado é interessante pois significa que, no momento em que nenhum dos modelos individuais é superior ao ensemble completo, as incertezas referentes às diferentes concepções de modelos de diferenças são maiores que os erros das previsões. Em outras palavras, um desenvolvedor de sistemas de previsão baseado em modelos de diferenças vai obter mais benefício investindo seu tempo em desenvolver

ferramentas para usar todas as previsões juntas na forma de um conjunto, do que tentando encontrar qual seria um “melhor modelo” a ser usado.

De igual forma, este resultado mostra que um operador de um sistema de previsão baseado em diferenças, ao invés de ficar escolhendo qual o melhor modelo que deve adotar em uma dada situação de crise, na verdade obtém o maior benefício ao simplesmente adotar todos os modelos e usar todos eles na previsão.

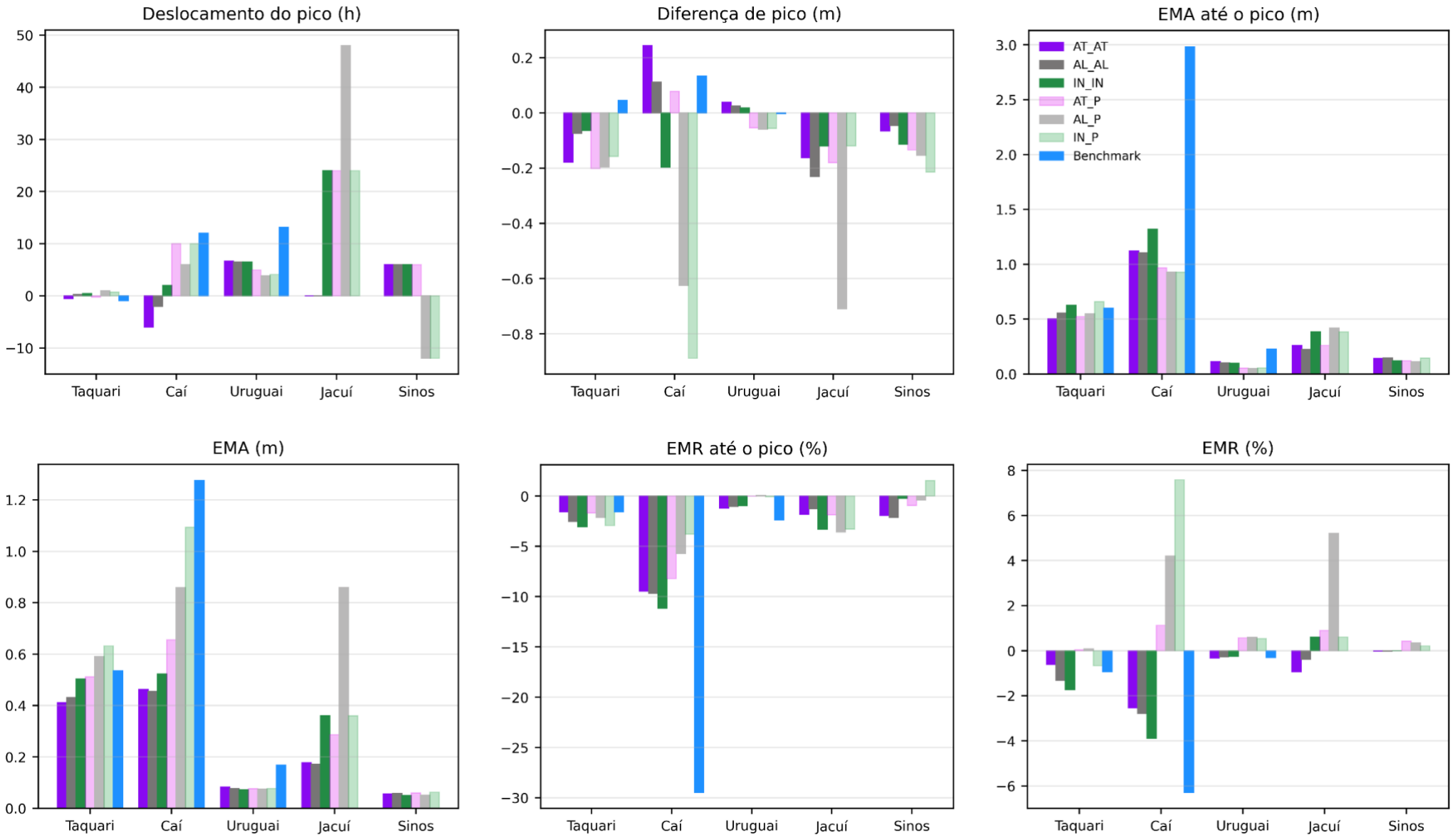

Figura 4.17. Média das métricas de desempenho para cada bacia.

4.2 Comparação das previsões de curto prazo dos modelos empíricos com o modelo MGB

Nesta parte do trabalho foram comparadas as previsões rodadas com o modelo MGB com as previsões dos modelos empíricos. Para isso, as previsões do MGB foram ancoradas nos dados observados nos pontos de previsão usados na validação dos modelos empíricos, verificando o seu desempenho no ponto de previsão imediatamente posterior ao ponto de ancoragem (usando sempre a previsão mais atual do modelo MGB). Dessa forma foi possível verificar o desempenho das previsões usando os diferentes modelos de previsão (MGB e modelos empíricos), nos pontos de previsão usados na validação dos modelos empíricos.

A Figura 4.18 apresenta os resultados das métricas de desempenho para a bacia do rio Taquari, cujos resultados ficam próximos aos obtidos com os modelos empíricos. O MGB apresentou EMA e EMA até o pico superiores e uma maior dispersão dos valores nas métricas em comparação com os resultados obtidos com os modelos empíricos. A diferença de pico próxima a zero destaca a acurácia do modelo nessa métrica.

Na bacia do rio Caí o MGB (Figura 4.19) apresentou resultados dentro das faixas dos cenários. Destacam-se o deslocamento de pico e a diferença de pico, ambas com resultados de mediana próximos a zero, com desempenho superior em relação a alguns cenários. Nos pontos de previsão da bacia do rio Uruguai o MGB apresentou uma maior dispersão dos resultados em relação aos demais cenários, em algumas métricas, e mesmo assim, os valores medianos das métricas do modelo e dos cenários ficaram muito próximos (Figura 4.20). Na bacia dos Sinos o MGB apresentou resultados dentro das bandas de incertezas dos cenários, com EMA levemente superior. Destaca-se o EMR próximo a zero, indicando boa acuraria nas previsões (Figura 4.21).

Avaliando a média das métricas por bacia (Figura 4.22), as previsões do MGB na bacia do rio Taquari destacam-se negativamente com tendência a superestimativa dos picos na ordem de 0,6 m e EMA e EMA até o pico superiores em comparação com os cenários. Destaca-se os valores baixos de EMR e EMR até o pico, com leve viés positivo, indo de encontro com a segurança. Na bacia do Caí os deslocamentos de pico do MGB foram levemente superiores aos demais cenários, indicando tendência de atraso na ocorrência dos picos. Observou-se também que os cenários IN_P e AL_P destacam-se pelo viés superior em relação aos demais cenários em grande parte das métricas.

A bacia do rio Uruguai destaca-se pelo equilíbrio dos resultados das métricas de desempenho entre os modelos empíricos, benchmark e MGB. Na bacia do rio dos Sinos os resultados foram mais equilibrados entre os modelos empíricos e o MGB, com EMA levemente superior. Na bacia do rio Jacuí o MGB apresentou resultados dentro das bandas de incerteza dos modelos empíricos, destacando-se em relação aos cenários em quase todas as métricas. Somente na diferença de pico indicou uma leve tendência de subestimativa. Para o Jacuí não foram apresentados gráficos de *boxplot* devido a presença de somente um evento de validação.

Dessa forma, observa-se que os modelos empíricos apresentaram melhor capacidade de representar os dados observados no curto prazo nas bacias analisadas, quando comparados ao MGB. Esse comportamento pode ser explicado pela própria natureza dos modelos. Os modelos empíricos utilizam diretamente as informações observadas de nível, baseando-se em associações estatísticas que incorporam o estado atual do sistema, o que reduz a propagação de incertezas e aumenta a sensibilidade na representação das variações recentes, especialmente durante a subida dos níveis.

Por outro lado, o MGB concentra diferentes fontes de incerteza ao longo da cadeia de modelagem. Entre elas, destacam-se a utilização de parâmetros e representações simplificadas da geometria fluvial, como batimetrias genéricas, além da dependência de previsões de chuva, que frequentemente apresentam discrepâncias em relação à precipitação efetivamente observada na bacia. Essas limitações estruturais e de entrada de dados contribuem para a redução do desempenho do modelo no curto prazo, período em que a acurácia das condições iniciais e das forçantes meteorológicas é determinante para a qualidade das previsões.

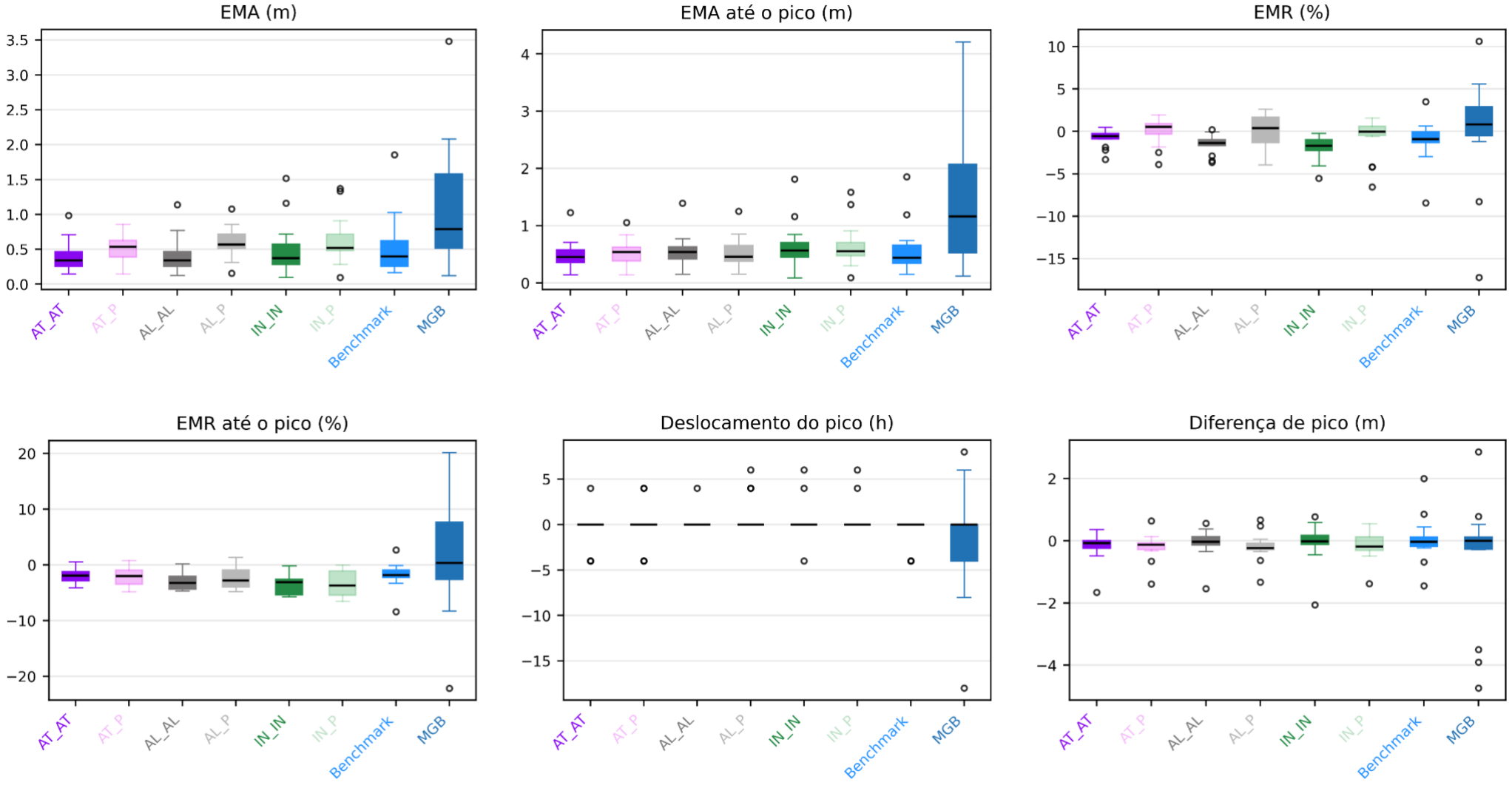

Figura 4.18. Boxplots das métricas de desempenho para os eventos de validação dos modelos empíricos, benchmark e MGB na bacia do rio Taquari (horizontes de 4 e 6 horas).

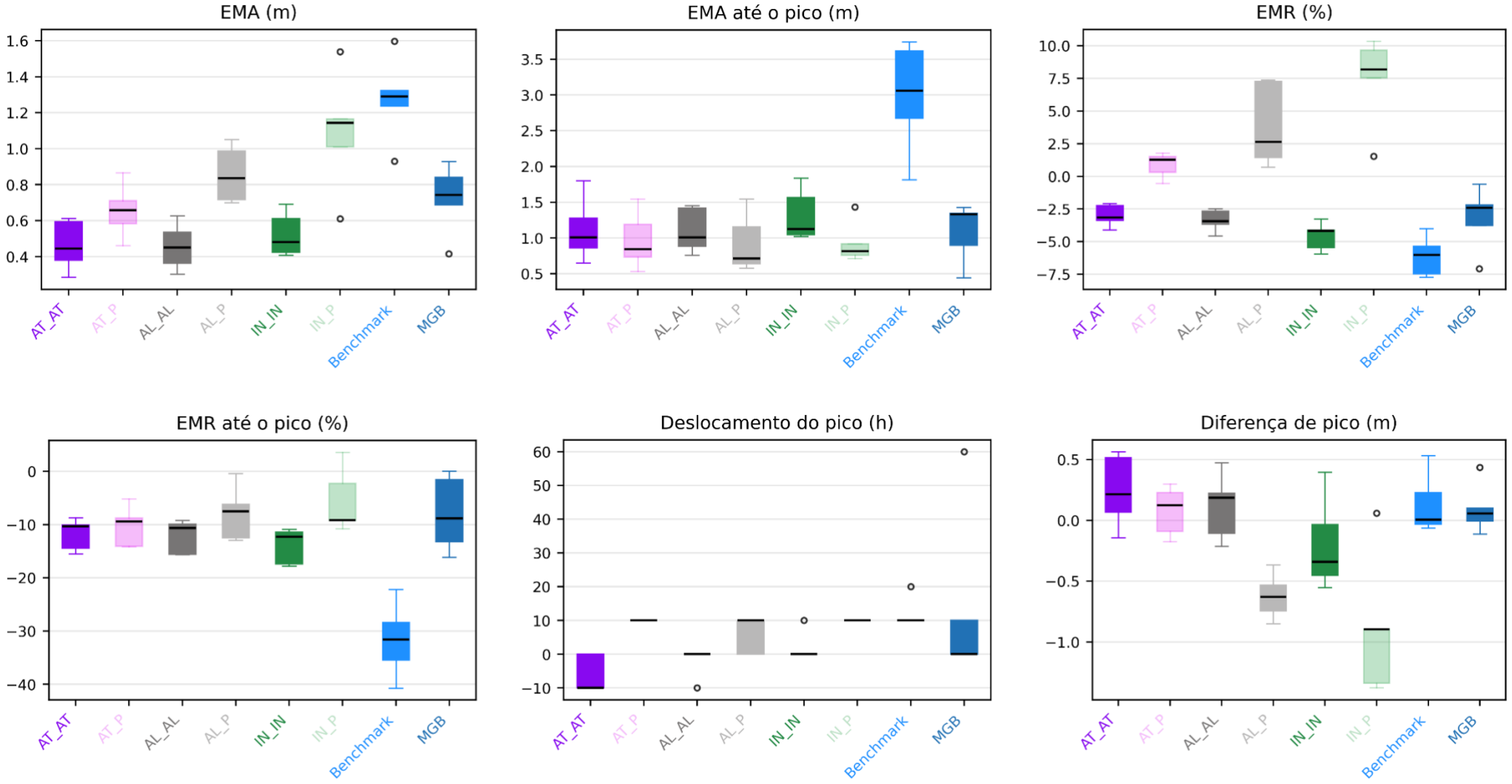

Figura 4.19. Boxplots das métricas de desempenho para os eventos de validação dos modelos empíricos, benchmark e MGB na bacia do rio Caí (horizonte de 10 horas).

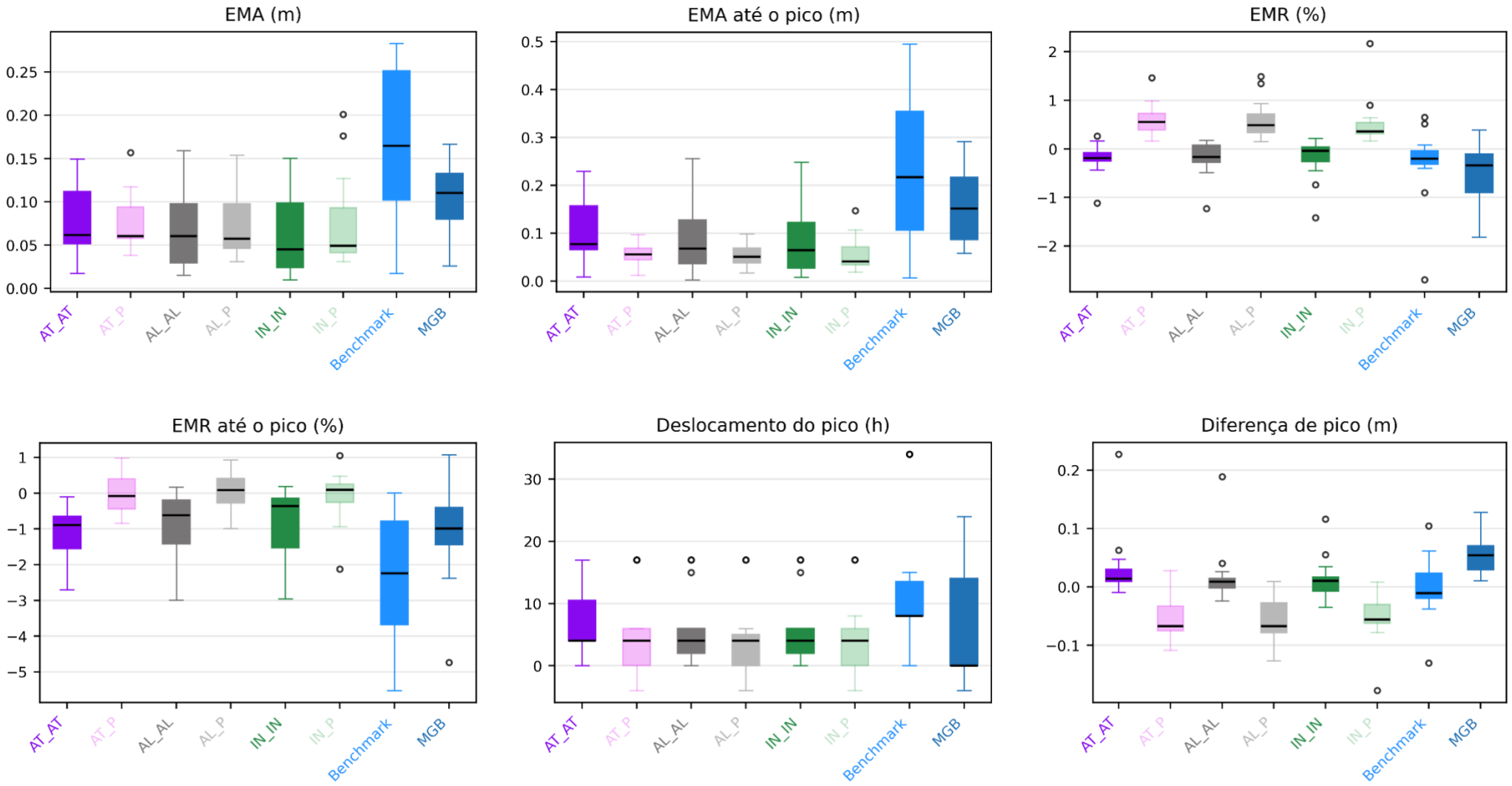

Figura 4.20. Boxplots das métricas de desempenho para os eventos de validação dos modelos empíricos, benchmark e MGB na bacia do rio Uruguai (horizontes de 4, 6, 10, 15 e 17 horas).

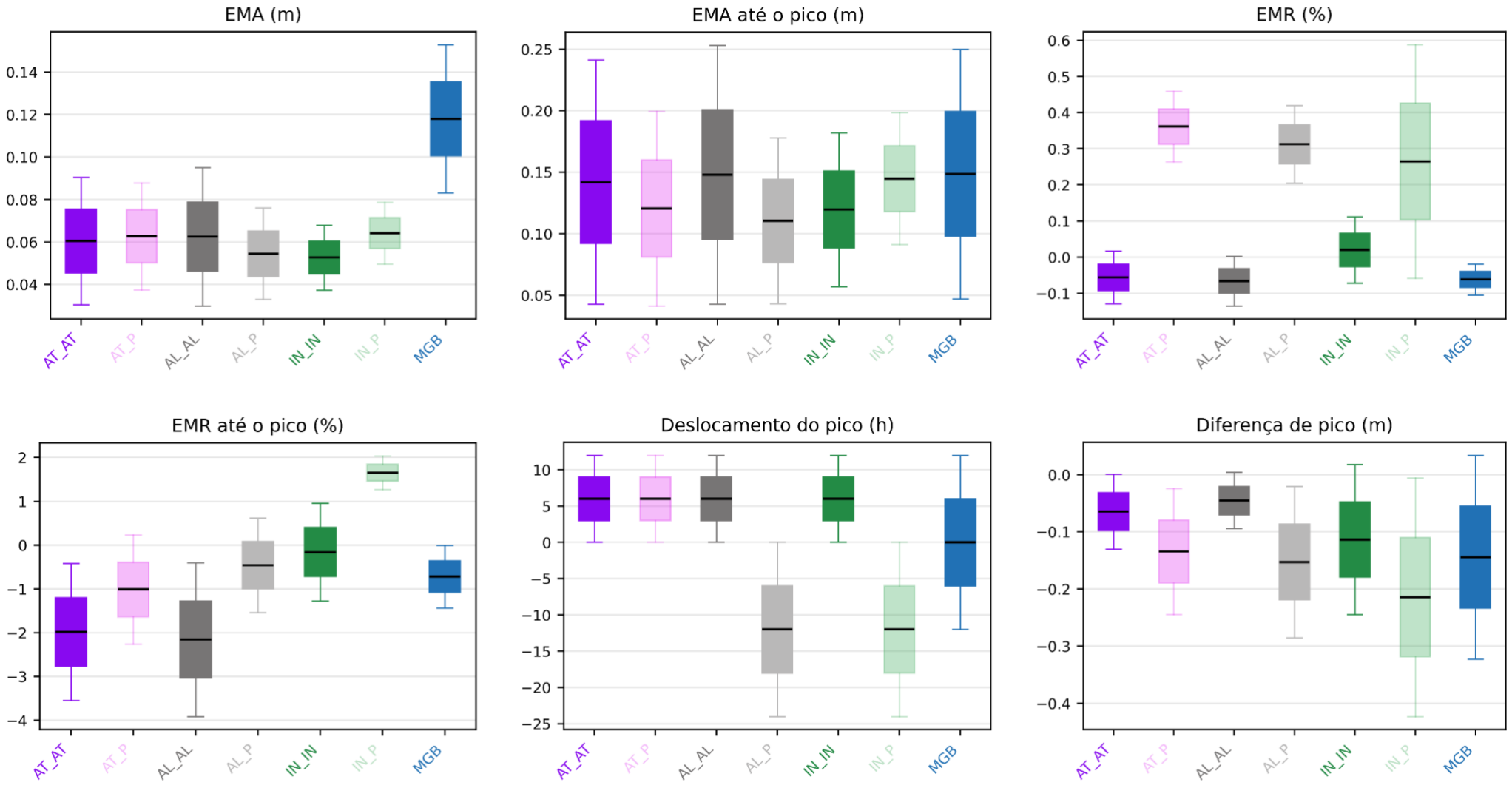

Figura 4.21. Boxplots das métricas de desempenho para os eventos de validação dos modelos empíricos, benchmark e MGB na bacia do rio dos Sinos (horizonte de 12 horas).

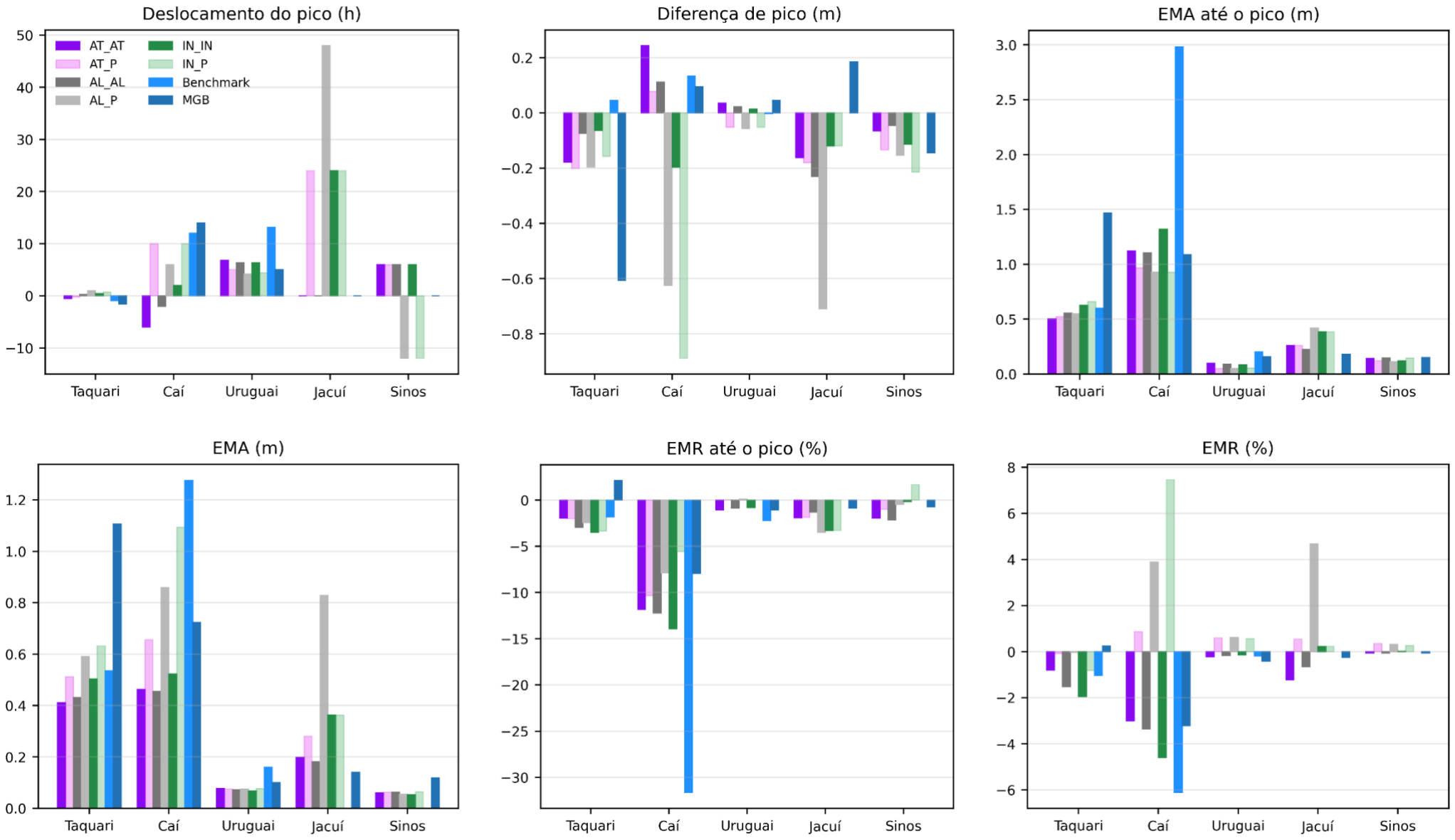

Figura 4.22. Média das métricas de desempenho para os modelos empíricos, benchmark e MGB para cada bacia.

4.3 Acoplamento de resultados dos modelos de curto prazo com previsões de médio prazo obtidas com o modelo MGB

Nesta seção é apresentado o resultado exclusivamente do modelo MGB, mas em diferentes cenários de "combinação" com os dados observados e com os modelos empíricos. O objetivo desta etapa do trabalho foi verificar a melhor forma de combinar as duas opções de modelagem de previsão, visando extrair a máxima acurácia de ambas, olhando para todo o horizonte de previsão possível com as ferramentas usadas. Os resultados são apresentados a seguir.

Para cada antecedência foi calculado o EMA, selecionado as estações que compõem as bacias dos rios Taquari, Caí e Uruguai (Figura 4.23). As bacias do rio dos Sinos e Jacuí não entraram na análise em função da baixa disponibilidades de eventos disponíveis na validação dos modelos empíricos. Nas três bacias o EMA do MGB ancorado nos dados observados mostrou-se menor do que os demais (MGB ancorado às 22h, MGB ancorado no cenário AT_AT e MGB puro) na grande parte das antecedências iniciais. Na bacia do rio Taquari, o MGB ancorado nos dados observados e ancorado as 22h apresentaram resultados semelhantes até a antecedência de aproximadamente 7h, depois disso a ancoragem nos dados observados destacou-se com o melhor desempenho, até a antecedência de 48h, aproximadamente. Após isso os resultados das diferentes formas de ancoragem vão se misturando, intercalando o melhor desempenho.

Algo semelhante acontece na bacia do rio Caí, onde o MGB ancorado nos dados observados destaca-se até a antecedência de 48h, e após isso os resultados vão misturando-se, e intercalando o desempenho. Observa-se uma menor dispersão dos resultados entre si e um desempenho inferior praticamente inânime do cenário de ancoragem nos modelos empíricos após a antecedência de 48h, aproximadamente.

Na bacia do rio Uruguai o EMA demonstra um comportamento mais regular, onde o MGB ancorado no observado apresenta EMA mais baixo em todas as antecedências, variando aproximadamente de 0 a 1, e ficando muito próximo das ancoragens no cenário AT_AT e na ancoragem às 22h. Além disso, o MGB puro apresenta EMA sistematicamente superior do que nos casos com ancoragem.

A mesma análise foi feita considerando o EMR dividindo os resultados por antecedência. Na bacia do Taquari (Figura 4.24) os resultados foram mais equilibrados, e o MGB puro mostrou maior dispersão dos resultados. Na bacia do rio Caí (Figura 4.25) o

comportamento foi semelhante ao do EMA, em que MGB ancorado nos dados observados apresentou o maior desempenho, indicando uma tendência de subestimativa das previsões. Assim como no EMA, o EMR do MGB puro foi maior em todas as antecedências na bacia do rio Uruguai, com tendência de superestimativa das previsões (Figura 4.26).

As previsões ancoradas apresentam melhor desempenho de maneira geral porque corrigem erros no estado inicial do modelo hidrológico. Nas simulações, incertezas associadas às condições iniciais (nesse caso níveis) podem se acumular e se propagar ao longo do tempo, degradando a qualidade das previsões. A ancoragem ao valor observado reduz esse erro inicial, fazendo com que a previsão se inicie mais próxima da realidade, o que melhora o desempenho principalmente nos primeiros horizontes. Esse efeito é mais pronunciado no curto prazo, quando a dinâmica do sistema ainda é fortemente influenciada pelas condições iniciais, enquanto, em maiores antecedências, a influência dos forçantes meteorológicos passa a predominar. Assim, quando a previsão inicia a partir de um valor diferente do observado, um erro já está presente no primeiro horizonte e tende a se propagar ao longo do tempo.

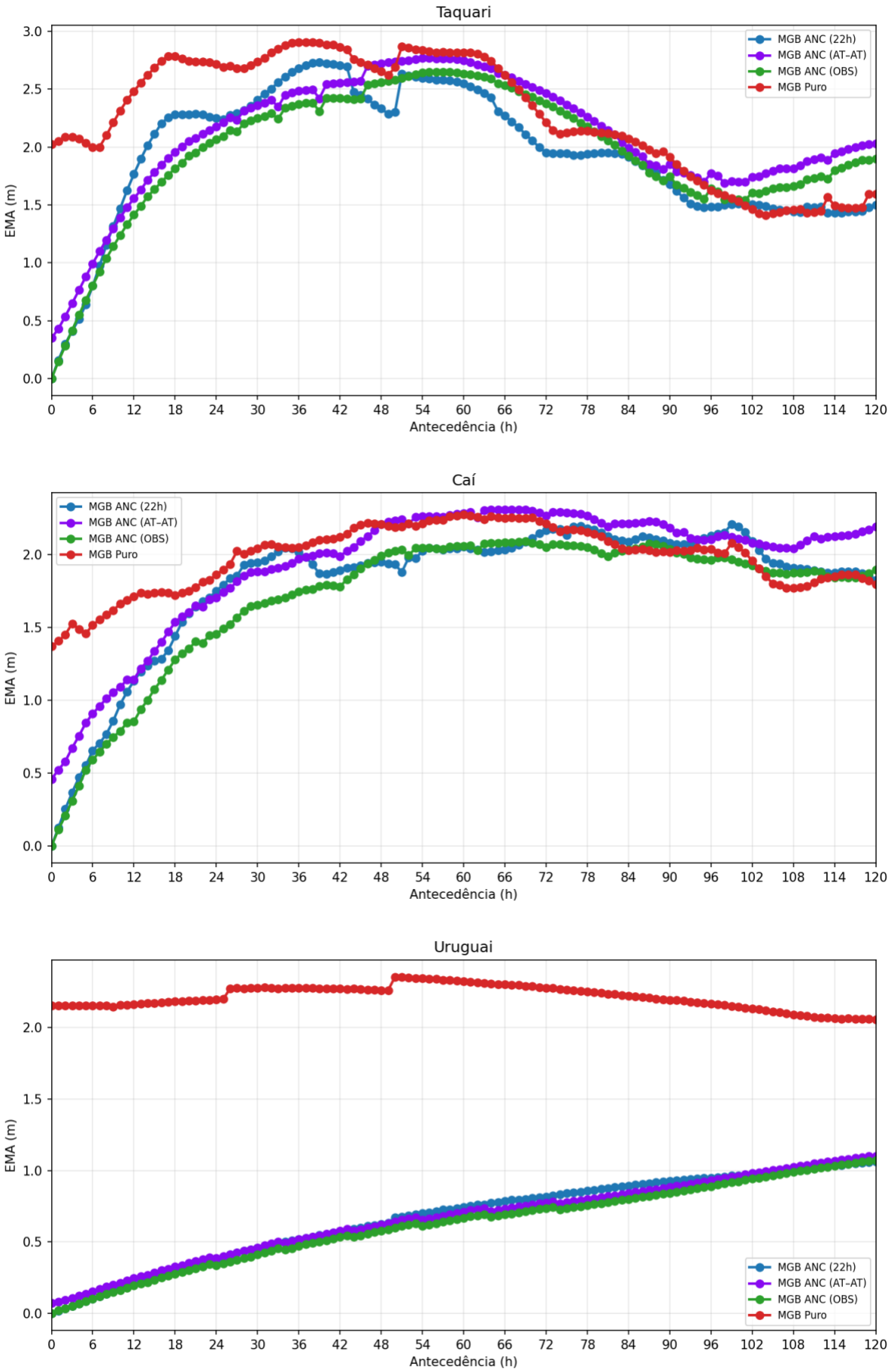

Figura 4.23.Resultados de EMA ao longo das antecedências.

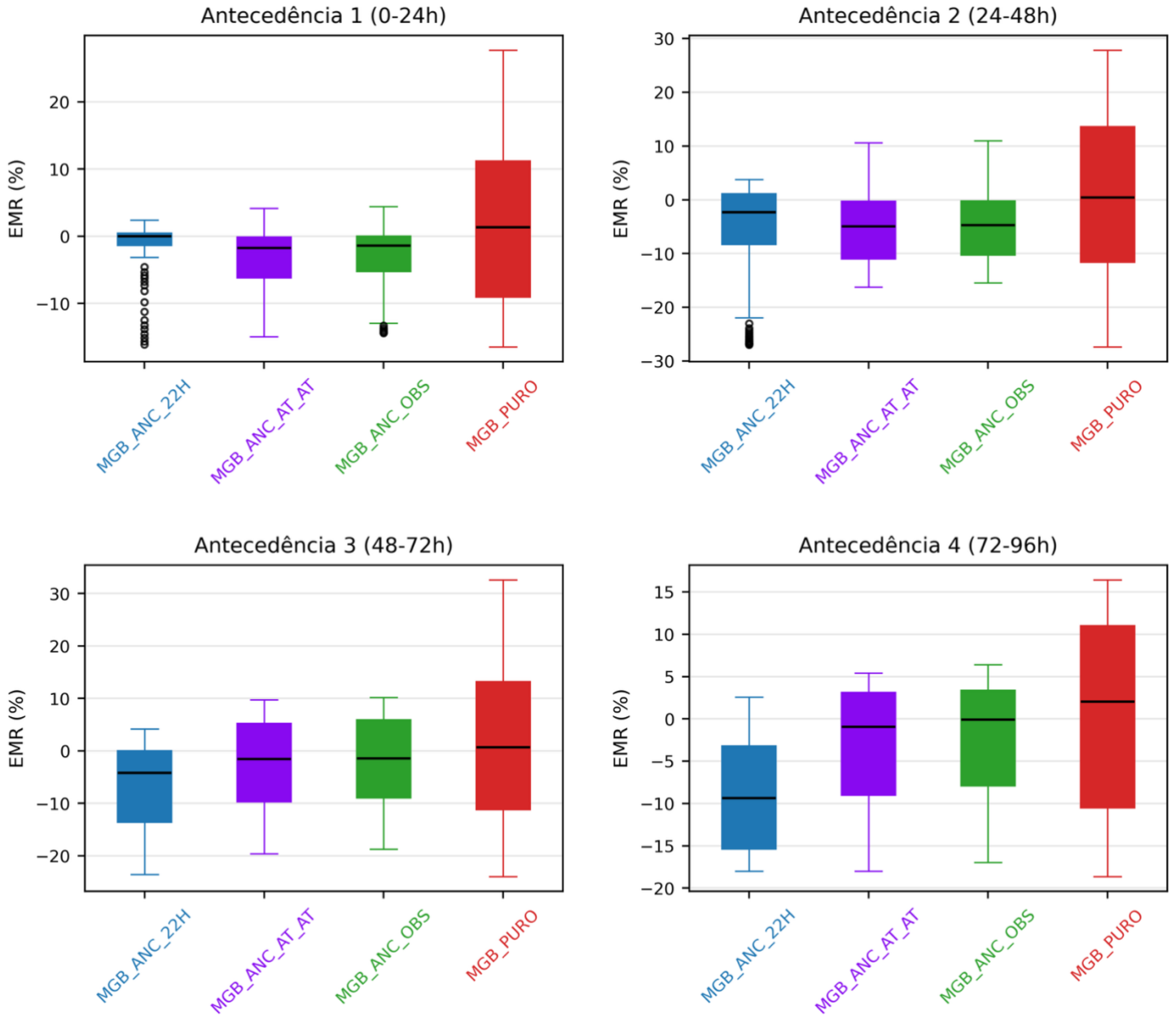

Figura 4.24. EMR para diferentes antecedências na bacia do rio Taquari.

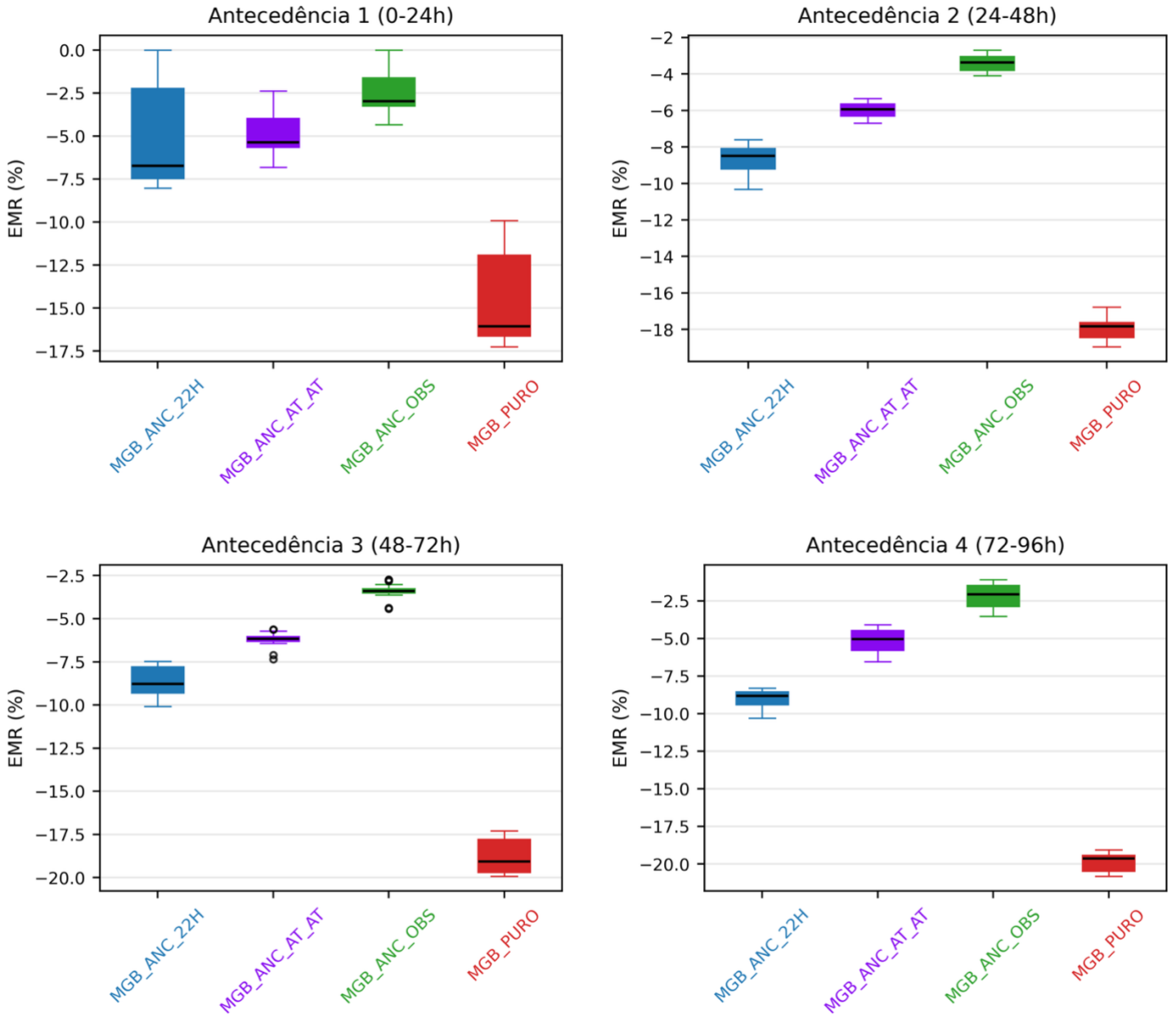

Figura 4.25. EMR para diferentes antecedências na bacia do rio Caí.

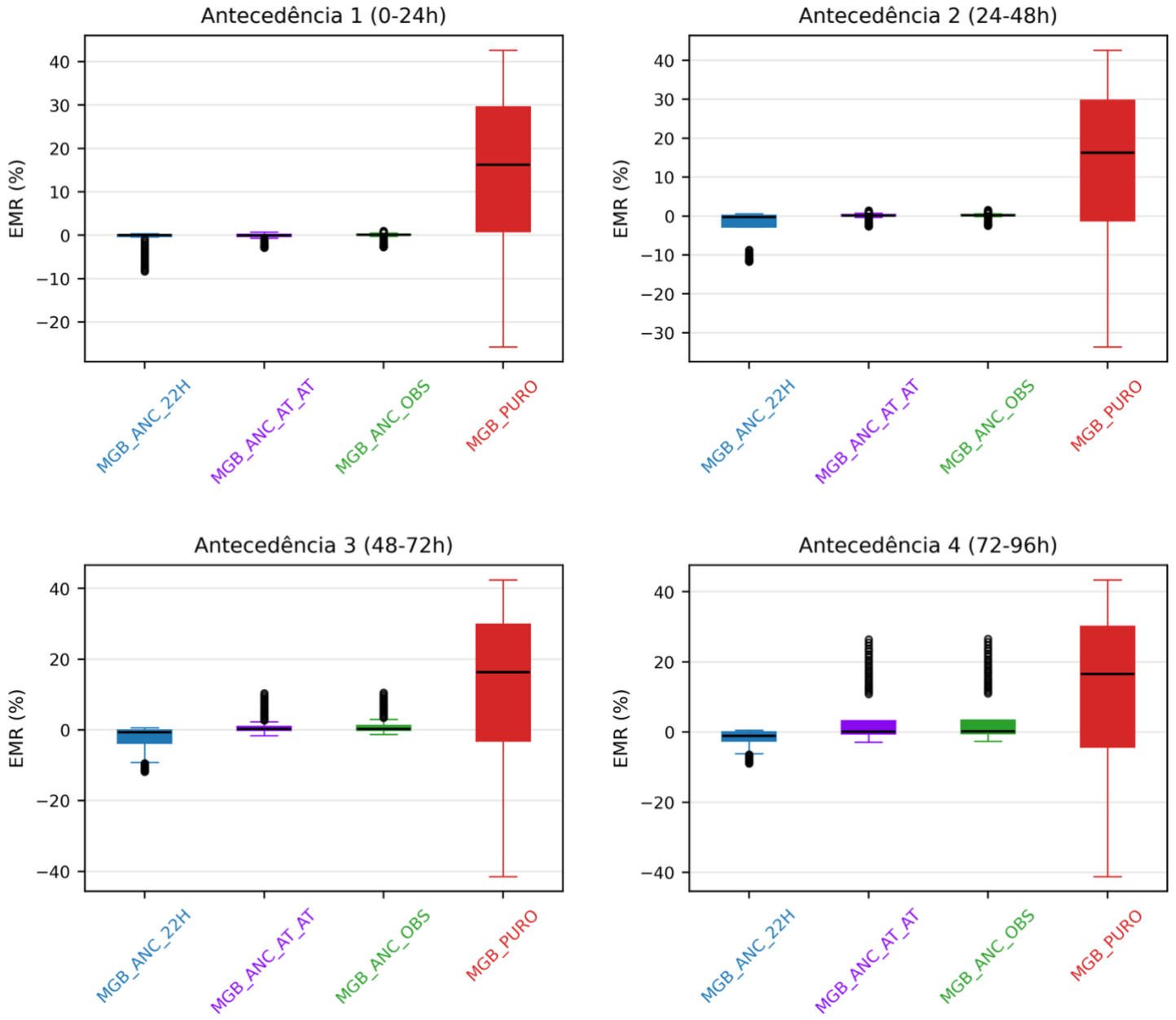

Figura 4.26. EMR para diferentes antecedências na bacia do rio Uruguai.

4.4 Comunicação das previsões

Os resultados apresentados anteriormente nesse capítulo discutem o desempenho de cada uma das previsões exploradas nesse trabalho: modelos empíricos, modelo MGB e acoplamento de ambos os modelos. Para ilustrar as possibilidades de apresentar as previsões, foram elaborados gráficos usando o modelo de boletins do SGB, de duas maneiras: usando somente os modelos empíricos e usando os modelos empíricos e o modelo MGB. A primeira imagem (Figura 4.27), mostra uma previsão em que é apresentada ao usuário somente a informação do nível na cidade de Encantando, na bacia do rio Taquari, com horizonte de 4 horas, correspondendo a 1441cm. A segunda imagem (Figura 4.28), contempla as informações dos modelos empíricos e do modelo MGB, apresentando ao usuário múltiplas informações: o nível do rio nas próximas 4h (1441cm), o dia estimado de ocorrência do pico (19/11/2023 às 02h, com um dia de antecedência aproximadamente em relação ao horário de emissão do boletim), a magnitude da cheia (podendo variar de 1901cm a 2101cm considerando uma incerteza de 5% nos dados) e o tempo de duração da cheia (aproximadamente mais dois dias até encontrar-se novamente abaixo da cota de inundação).

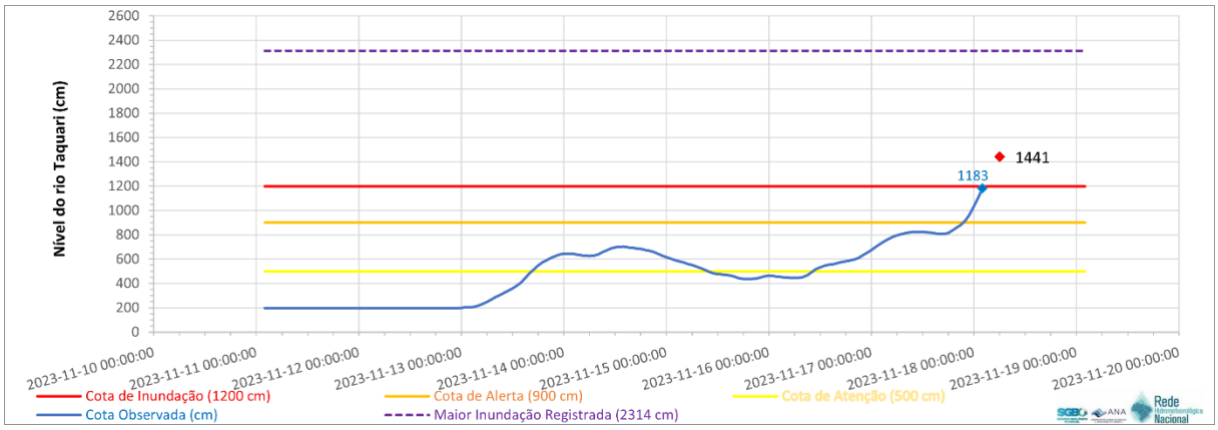

Figura 4.27. Boletim para a cidade de Encantado, no rio Taquari, utilizando somente os modelos empíricos para previsão de níveis.

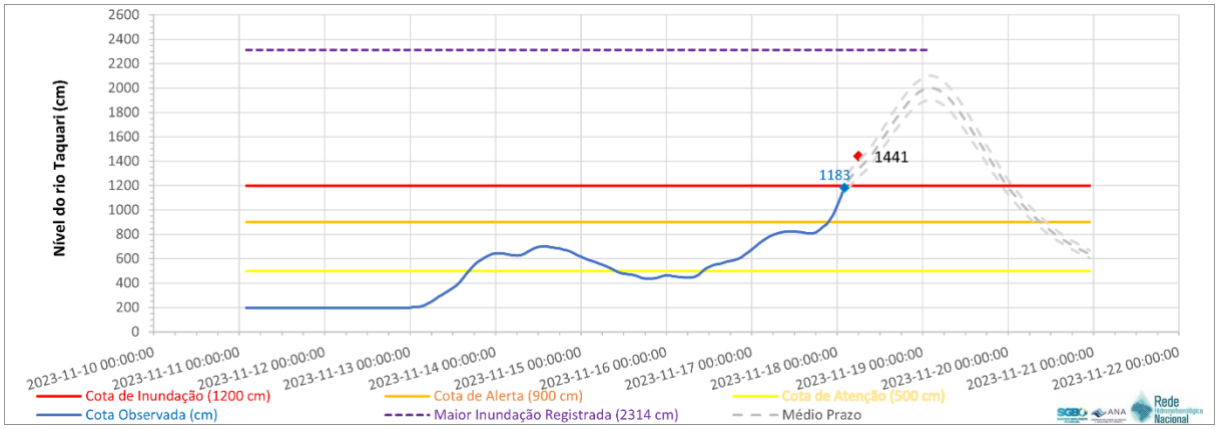

Figura 4.28. Boletim para a cidade de Encantado, no rio Taquari, utilizando para as previsões de níveis os modelos empíricos e o modelo MGB.

Observa-se na comparação dos dois gráficos que a inclusão da previsão do modelo MGB nos boletins aumenta o número de informações disponibilizadas ao usuário, e, consequentemente, aos tomadores de decisão, como é o caso da Defesa Civil. Nesse cenário as previsões de médio prazo podem auxiliar na gestão da implementação de medidas de contingência, com mais antecedência.

Além dos gráficos, sugere-se incluir nos boletins do SGB mais uma tabela contendo informações referentes as previsões de médio prazo do modelo MGB. A sugestão é que a tabela possa apresentar ao usuário do boletim os níveis, considerando uma margem de incerteza aplicadas nos dados, buscando informar que os níveis futuros podem estar dentro de um intervalo de valores, indo de encontro com a segurança. Além dos níveis, sugere-se a incorporação da data e da hora de ocorrência do pico da cheia. A Figura 4.29 mostra um exemplo de inclusão da tabela com as informações de médio prazo para a cidade de Encantado.

Médio Prazo						
Status Atenção Alerta Inundação	Nome da Estação	Nome do Curso D'Água	Município	Cota de Inundação na Estação Fluviométrica	Previsão aprox. pico (Médio Prazo)	
				---------- cm ----------		Data e Hora
●	Encantado	Rio Taquari	Encantado	1200	Entre 1901cm e 2101cm	19/11/2023 02h

Figura 4.29. Exemplo de tabela que pode ser incluída no boletim operacional do SGB.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta dissertação teve como objetivo elaborar e aperfeiçoar modelos empíricos de previsão e avaliar estratégias para a sua integração com o modelo de grandes bacias (MGB), em localidades do RS. Como objetivos específicos foram testadas alternativas de concepção de modelos empíricos de previsão hidrológica, foram comparados os resultados do modelo MGB com os resultados dos modelos empíricos e foram acopladas as previsões de ambos os modelos, formando uma só previsão conjunta.

Os modelos empíricos foram avaliados a partir de 6 métricas, buscando identificar como as previsões compartam-se em diferentes fases do hidrograma e pontos de interesse (EMA, EMA até o pico, EMR, EMR até o pico, deslocamento de pico e diferença de pico). Na avaliação dos últimos grandes eventos de cheia (setembro de 2023, novembro de 2023, abril e maio de 2024 e junho e julho de 2025), os resultados aproximaram-se dos dados observados e mostraram-se uma ferramenta em potencial para a geração de previsões no curto prazo.

A concepção dos modelos empíricos a partir dos 6 cenários de calibração mostrou que o desempenho das previsões está fortemente associado ao comportamento hidrodinâmico das bacias hidrográficas, em especial às variações de níveis dos rios. Bacias mais rápidas, como a do Taquari e a do Caí, tendem a apresentar subestimativas e maior dispersão nas previsões, enquanto bacias de resposta mais lenta, como a do Uruguai e a do Sinos, as previsões tendem a apresentar menor viés e menor dispersão.

Na bacia do rio Taquari, as maiores incertezas concentraram-se na fase inicial de subida do hidrograma e na estação Estrela, refletindo a maior variabilidade hidrológica local. Observou-se ainda um padrão consistente entre métricas, com cenários avaliados entre limiares apresentando menores EMAs, enquanto as análises até o pico tenderam a superestimar os níveis, embora com melhor equilíbrio do EMR na fase de subida.

Na bacia do rio Caí, a análise ficou restrita à estação Barca do Caí, em função das falhas na estação Passo Montenegro: observou-se uma maior dispersão entre os cenários e em vieses mais pronunciados, especialmente nos cenários de inundação até o pico, marcados por superestimativas sistemáticas. Ainda assim, métricas como o EMR até o pico indicaram que a avaliação focada na fase de subida pode trazer ganhos na representação relativa dos eventos, enquanto o deslocamento do pico e a diferença de pico mostraram desempenho satisfatório em cenários específicos.

Em contraste, a bacia do rio Uruguai apresentou o conjunto mais consistente de resultados, com baixos erros absolutos e relativos, elevada convergência entre cenários e adequada representação temporal e de magnitude dos picos, sugerindo que, nesse caso, os erros residuais podem estar mais associados às incertezas de medição do que às limitações dos modelos. Já nas bacias do rio Jacuí e do rio dos Sinos, a análise foi limitada pelo reduzido número de eventos disponíveis, o que restringe conclusões mais robustas.

Com foco no EMA até o pico, observam-se valores inferiores a 0,5 metros nas bacias dos rios Uruguai, Jacuí e Sinos e inferiores a 0,7 metros na bacia do Taquari. Esses níveis de erro incorporam não apenas incertezas associadas às previsões, mas também oscilações naturais dos níveis dos rios, limitações na resolução e estabilidade das leituras dos sensores, além de incertezas decorrentes do processamento e tratamento dos dados observados. Nesse contexto, os valores de EMA obtidos sugerem que os modelos empíricos atingem um patamar de desempenho próximo ao limite imposto pela própria qualidade das observações disponíveis, indicando boa capacidade de representação da fase de subida dos eventos analisados.

Na bacia do Caí os erros são maiores, na ordem de 1,3 m, e por ser uma bacia muito rápida, diminuir o horizonte da previsão, aumentar o monitoramento e agregar mais formas de geração de previsões (além dos modelos empíricos e por redes neurais), pode auxiliar na melhora do desempenho das previsões.

Os cenários foram capazes de representar situações de superestimativas e subestimativas dos valores das previsões, abrangendo os dados observados, tornando-se uma ferramenta de representação das incertezas associadas as previsões. Indo de encontro com a segurança, a capacidade de uma previsão em informar possíveis cenários torna-a uma ferramenta mais resiliente em auxiliar os tomadores de decisão, já que possibilita explorar cenários pessimistas, que tem pouca probabilidade de acontecer, mas que podem vir a ocorrer.

Com mais de um resultado, esse conjunto de previsões determinísticas foi avaliado como um ensemble de previsões, tornando-se uma previsão probabilística, cuja habilidade em representar os dados observados foi igual ou superior em todas as bacias, quando comparada com o uso individual de cada cenário. Destaca-se que, nas bacias com maior dispersão entre cenários (Taquari e Caí), a previsão por conjunto pode ser particularmente vantajosa, pois permite representar explicitamente a incerteza associada às diferentes trajetórias possíveis dos eventos.

De forma geral, a comparação entre o MGB e os cenários empíricos evidencia que o modelo hidrológico apresentou desempenho compatível com as faixas de incerteza dos cenários na

maior parte das bacias avaliadas, reforçando sua consistência como ferramenta complementar às previsões empíricas. Na bacia do rio Caí, o MGB destacou-se positivamente nas métricas relacionadas ao tempo e à magnitude do pico, com medianas próximas a zero para deslocamento e diferença de pico, superando parte dos cenários empíricos. Nos pontos de previsão da bacia do rio Uruguai, observou-se uma convergência de desempenho entre o MGB e os modelos empíricos. Na bacia do rio dos Sinos, o MGB manteve-se dentro das bandas de incerteza dos cenários, com leve aumento do EMA, mas com EMR próximo a zero, o que indica boa acurácia global das previsões.

Ao analisar a média das métricas por bacia, observou-se que, na bacia do rio Taquari, o MGB apresentou tendência à superestimativa dos picos, com erros absolutos superiores aos dos cenários empíricos, embora com baixos valores de EMR e EMR até o pico, o que sugere uma postura mais conservadora sob a ótica da segurança hidrológica. Na bacia do rio Caí, os resultados indicaram leve atraso na previsão do pico pelo MGB, enquanto nas bacias do rio Uruguai e do rio dos Sinos verificou-se maior equilíbrio entre os desempenhos do MGB e dos modelos empíricos. Por fim, na bacia do rio Jacuí, o reduzido número de eventos disponíveis destaca a necessidade de análises adicionais para consolidação das conclusões nessa bacia.

A análise das métricas em função da antecedência reforça de forma clara os benefícios do acoplamento do MGB com os dados observados. De maneira consistente nas bacias dos rios Taquari, Caí e Uruguai, as ancoragens do MGB reduziram os erros em relação ao MGB puro, especialmente nas menores antecedências. Esse comportamento reforça a importância do acoplamento como estratégia para mitigar incertezas associadas à inicialização do modelo hidrológico.

À medida que a antecedência aumenta, observa-se uma transição no desempenho entre as diferentes formas de ancoragem, particularmente nas bacias dos rios Taquari e Caí, onde o MGB ancorado às 22h e o MGB puro passam a apresentar desempenho comparável ou superior em horizontes mais longos. Esse resultado sugere que, para maiores antecedências, a influência das condições iniciais tende a se diluir, e a dinâmica interna do modelo hidrológico e os forçantes meteorológicos passam a dominar a evolução das previsões. Na bacia do rio Uruguai, o comportamento mais regular do EMA e do EMR ao longo das antecedências indica maior estabilidade hidrológica e melhor condicionamento do modelo, com ganhos mais uniformes decorrentes da ancoragem ao observado.

O valor de uma previsão pode ser visto como a capacidade de uma previsão de apresentar benefícios para a tomada de decisão, indo além dos números exatos, uma previsão valorosa

entrega resultados úteis, buscando minimizar perdas ou maximizar benefícios, por exemplo. Durante a ocorrência de eventos de cheia, torna-se essencial o conhecimento de muitas fases importantes, indo de qual será o nível do rio das próximas horas a entender qual será a magnitude da cheia. Essas informações permitem, por exemplo, a antecipação da emissão de alertas hidrológicos com maior confiabilidade, a indicação mais precisa da superação das cotas de atenção, alerta e inundação, e o planejamento de ações como evacuação de áreas de risco.

Como principal conclusão do trabalho destaca-se que o uso combinado das previsões dos modelos empíricos com as previsões do modelo MGB cria uma previsão conjunta com um valor substancialmente maior. Isso deve-se já que a união das informações fortalece as previsões individualmente. Os modelos empíricos proporcionam mais acuraria no curto prazo enquanto o MGB possibilita entender no curto/médio prazo o comportamento dos níveis de água, possibilitando a identificação da magnitude da cheia, dia do pico, duração, entre outras.

Essa previsão conjunta pode ser informada nos boletins, que podem apresentar a previsão de níveis para as próximas horas e também a previsão para os próximos três dias, por exemplo. Em eventos de grande magnitude, essa combinação de informação para os tomadores de decisão pode mitigar de maneira significativa as consequências do evento, como perdas humanas e prejuízos econômicos.

A falta de dados observados destaca-se como a principal limitação desse estudo, já que em grandes eventos de cheia os medidores de níveis tendem a ser danificados ou parar de medir. Ressalta-se, então, a importância da instalação de medidores capazes de operar initerruptamente durante os eventos de cheia, e da necessidade de aumento da densidade de estações fluviométricas no estado.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a incorporação de novos pontos de monitoramento nos modelos empíricos, de modo a avaliar ganhos de desempenho associados a uma representação espacial mais detalhada das bacias. Nesse contexto, torna-se relevante também o desenvolvimento de metodologias de adaptação dos modelos para lidar com situações de indisponibilidade de dados nas estações de montante, condição frequentemente observada em aplicações reais.

Adicionalmente, sugere-se a investigação da influência individual e conjunta das estações de montante no desempenho das previsões, por meio da comparação entre configurações que utilizem múltiplos pontos de montante e aquelas baseadas exclusivamente na estação de jusante. Essa análise permitiria compreender melhor a contribuição efetiva de cada ponto de monitoramento e apoiar decisões sobre a complexidade necessária dos modelos empíricos.

Outra linha de continuidade envolve a avaliação de novas estratégias de ancoragem tanto para os modelos empíricos quanto para o MGB, explorando combinações alternativas e adaptações dinâmicas ao longo das antecedências de previsão. Por fim, recomenda-se a implementação e o teste dos modelos empíricos em um ambiente operacional, o que possibilitaria identificar falhas, limitações e desafios associados ao uso sob condições reais, especialmente em situações de maior pressão decisória, como a ocorrência de eventos de cheia.

6. REFERÊNCIAS

ALFIERI, L. et al. GloFAS-global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 3, p. 1161–1175, 2013.

ANA - Agência Nacional de Águas. (2014). **Atlas de Vulnerabilidade a Inundações.** Brasília: ANA. Disponível em http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/

Arias, P.A., et al. **Technical Summary. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33−144, 2021.

Bravo, J. M**. Subsídios à operação de reservatórios baseada na previsão de variáveis hidrológicas**. Tese de doutorado - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BYRD, R. H.; LU, P.; NOCEDAL, J.; ZHU, C. A limited memory algorithm for bound constrained optimization. **SIAM Journal on Scientific Computing**, vol. 16, no 5, p. 1190–1208, 1995.

BOUGEAULT, P. *et al.* The thorpex interactive grand global ensemble. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 91, nº 8, p. 1059–1072, 2010.

BUFFON, F. et al. **Relatório de Atividades Departamento de Hidrologia: Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do rio Taquari: relatório técnico de operação no período de novembro de 2020 a novembro 2021**. Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 2021.

COLLISCHONN, W. et al. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878–895, 2007.

COLLISCHONN, W. et al. **Manual de Referência Teórica do MGB**. HGE, IPH, UFRGS, v. 46, 2020.

COLLISCHONN, W. et al. Análise da antecedência mínima necessária para previsões de inundações em Lajeado no Rio Taquari (RS). **Anais do II Encontro Nacional de Desastres**, 2020.

COLLISCHONN, W. et al. Unprecedented April-May 2024 rainfall in South Brazil sets new record. **Revista Brasileira de Recursos Hidricos**, v. 29, 2024.

COLLISCHONN, W. et al. The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in southern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 30, 2025.

CORREIO DO POVO. 2025. Elevação do rio Jacuí provoca a terceira maior enchente da história da região central do RS. Disponível em: https://www.correiodopovo.com.br/not%C3%ADcias/cidades/eleva%C3%A7%C3%A3o-do-rio-jacu%C3%AD-provoca-a-terceira-maior-enchente-da-hist%C3%B3ria-da-regi%C3%A3o-central-do-rs-1.1620906. Acessado em 17 fev. 2026.

DION, P.; MARTEL, J. L.; ARSENAULT, R. Hydrological ensemble forecasting using a multi-model framework. **Journal of Hydrology**, vol. 600, 2021.

DOS SANTOS ALVALÁ, R. C. et al. Analysis of the hydrological disaster occurred in the state of Rio Grande do Sul, Brazil in September 2023: vulnerabilities and risk management capabilities. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 110, p. 104645, 2024.

FAN, F. M. **Previsão por conjunto de vazões afluentes a reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras**. Tese de doutorado - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

FAN, F. M. et al. Avaliação de previsões de cheias operacionais para a bacia do alto rio Uruguai (Brasil). **Revista Brasileira de Recursos Hidricos**, v. 22, 2017.

Fan, F. M.; Alves, E. M.; Siqueira, V. A.; Fernandez, G. M. R.; Laipelt L.; Breda, J. P. L.; Ruhoff, A.; Paiva, R. C. D., Fleischmann, A.S. Relatório Final do Subprojeto Avaliação de Estimativas de Áreas Inundadas do Modelo MGB, 2020.

FARR T. G., et al. The shuttle radar topography mission. **Reviews of geophysics**, 45(2), 2007.

FERRI, G. A.; e TOGNI, A. C. **A história da bacia hidrográfica Taquari-Antas**. Lajeado: Ed. da Univates: 375p, 2012.

G1. 2025. Chuva no RS: quase 8 mil pessoas estão fora de casa e 121 cidades sofrem prejuízos; há 3 mortos e 1 desaparecido. Disponível em: https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2025/06/21/chuva-no-rs-quase-8-mil-pessoas-estao-fora-de-casa-e-121-cidades-sofrem-prejuizos-ha-3-mortos-e-1-desaparecido.ghtml. Acessado em 17 fev. 2026.

GERMANO, A. O. et al. **Nota técnica: avaliação indireta do nível máximo do Guaíba na região central de Porto Alegre entre as estações Cais Mauá C6 e Usina do Gasômetro**. Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 2024.

GIACOMELLI, Lucas et al. Previsão de cheias e produção de avisos no estado do Rio Grande do Sul através da sala de situação SEMA/RS e modelo MGB. **Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Foz do Iguaçu, 2019.

GUIMARAENS, R. **A Enchente de 41**. Porto Alegre: Libretos: 100 p, 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS (IPH). Relatório de andamento – Meta 3: ajuste do MGB no Rio Grande do Sul hidrológico. Versão 2. Projeto: Aprimoramento de Sistema de Alerta de Cheias para o Rio Grande do Sul Hidrológico (TED entre SGB e IPH-UFRGS). Porto Alegre: IPH/UFRGS, 2025a.

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS (IPH). Relatório de andamento – Meta 2*:* desenvolvimento e teste de um produto de chuva observada em escala horária. Projeto: Aprimoramento de Sistema de Alerta de Cheias para o Rio Grande do Sul Hidrológico (TED entre SGB e IPH-UFRGS). Porto Alegre: IPH/UFRGS, 2025b.

Kobiyama, M., CHECCHIA, T., SILVA, R. V. D., SCHRÖDER, P. H., Grando, A., & REGINATTO, G. M. P. Papel da comunidade e da universidade no gerenciamento de desastres naturais. **Anais do I Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais**, Florianópolis, 2004.

LI, M. et al. A strategy to overcome adverse effects of autoregressive updating of streamflow forecasts. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 1, p. 1-15, 2015.

LAIPELT, L. et al. ANADEM: A Digital Terrain Model for South America. **Remote Sensing**, v. 16, n. 13, 2024.

LEUTBECHER, M.; PALMER, T. N. Ensemble forecasting. **Journal of Computational Physics**, vol. 227, nº 7, p. 3515–3539, 2008.

MARCUZZO, F. F. N.; PINTO, E. J. D. A. Tempo de retorno de cotas de grandes cheias e do sistema de alerta hidrológico em São Sebastião do Caí, RS. **Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Aracaju, 2023.

MATTIUZI, C. D. P.; OLINTO, F. A. S.; MORAIS, C. C. C.; BUFFON, F. T.; MATOS, A. J. S. Ocorrências de inundação e relação com fenômeno ENOS na bacia do rio Uruguai. **Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Aracaju, 2023.

MATTIUZI, C. D. P.; MATOS, A. J. S. **Relatório de operação do Sistema de Alerta Hidrológico da bacia do Rio Uruguai 2023**. Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 2023.

MIRANDA, P. T.; PAIVA, R. C. D. D.; PETRY, I.; COLLISCHONN, WM. Cheia recorde no sul do Brasil expõe necessidade de adaptação às mudanças climáticas. **Anais do IV Encontro Nacional de Desastres**, Curitiba, 2024.

MIRANDA, Pedro et al. Rios da região Sul possuem as cheias mais abruptas do Brasil. **Anais do IV Encontro Nacional de Desastres,** Curitiba, 2024.

MELLER, A. **Previsão de cheias por conjunto em curto prazo**. Tese de doutorado - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MEDEIROS, M.; FAN, F.; PAIVA, R. Avaliação de previsões operacionais de níveis do Guaíba realizadas durante a cheia sem precedentes no Rio Grande do Sul, Brasil. **Anais do IV Encontro Nacional de Desastres**, Cutiriba, 2024.

MORAES, S. R.; COLLISCHONN, W.; BUFFON, F. T.; ECKHARDT, R. R. **Revisão e consolidação da série histórica dos níveis das cheias do rio Taquari em Lajeado de 1939 a 2023**. Porto Alegre, 2024. Nota técnica. Disponível em: www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=001199403&loc=2024&l=7818d897802ef3c6.

MOLTENI, F. *et al.* The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and validation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, vol. 122, nº 529, p. 73–119, 1996.

MORAWIETZ, Martin et al. Systematic evaluation of autoregressive error models as post-processors for a probabilistic streamflow forecast system. **Journal of Hydrology**, v. 407, n. 1-4, p. 58-72, 2011.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine – NASEM. **Next generation earth system prediction: strategies for subseasonal to seasonal forecasts.** Washington, DC: The National Academies Press, 2016.

NONNEMACHER, L.; FAN, F. Análise da viabilidade econômica da previsão de cheias no Rio Grande do Sul. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 20, n. 1, p. 8–0, 2023. NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. J. **Numerical optimization**. 2. ed. New York: Springer, 2006.

OLIVEIRA, R. C. et al. Qual é a melhor métrica de desempenho para reproduzir as previsões do SACE para a cheia de novembro de 2023 em Encantado? **Anais do XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Vitória, 2023.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; MIRANDA, P. T.; FAGUNDES, H.O.; KOLLING, A.; CASTRO, L.; ROSSI, J.; MATTE, G.; LAIPELT, L.; ALVES. W; PETRY. I. **CLIMA: Impactos de Mudanças Climáticas em Extremos de Vazão (Cheias e Estiagens) – Relatório Final**. IPH-ANA-HGE-CLIMA-A3. UFRGS: IPH, Porto Alegre. ANA, Brasília, 2024a.

PAIVA, Rodrigo et al. Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: Chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil. **Nota técnica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre**, v. 27, 2024b.

PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de et al. Adaptação e resiliência a cheias no Rio Grande do Sul no contexto da variabilidade e mudança climática. **Ferrer, Joao Carlos Camargo. Daneris, Marcelo Tuerlinckx. Marques, Pedro Romero (Org.). RS: resiliência & sustentabilidade:**

reflexões para reconstrução do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Libretos, 2025. p. 262-291, 2025a.

PAIVA, R. C. D.; FAN, F.M.; COLLISCHONN, W.; MEDEIROS, M, S.; OLIVEIRA, R.C.; LIMA, S.G.; CAMARGO, P.; MEDEIROS, P.M. **Caracterização e modelagem das cheias de 2023 e 2024 no Rio Grande do Sul em escala regional**. Relatório Técnico. UFRGS: IPH, Porto Alegre, 2025b.

PAPPENBERGER, F., et al. **Operational HEPS systems around the globe**. Disponível em: http://hepex.irstea.fr/operational-heps-systems-around-the-globe/#comment-791. Último acesso em 15 de junho de 2025.

PAPPENBERGER, F. *et al.* How do I know if my forecasts are better? Using benchmarks in hydrological ensemble prediction. **Journal of Hydrology**, vol. 522, p. 697–713, 2015.

PETRY, I. et al. **Changes in Flood Magnitude and Frequency Projected for Vulnerable Regions and Major Wetlands of South America.** Geophysical Research Letters, v. 52, n. 5, 2025.

PETRY, Ingrid; FAN, Fernando M.; WOOD, Andy. The influence of ENSO patterns on floods in Southeastern South America. In: **AGU Fall Meeting Abstracts**. 2024. p. H14A-02.

POSSA, T. M. et al. Hydrological-hydrodynamic simulation and analysis of the possible influence of the wind in the extraordinary flood of 1941 in Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 27, 2022.

RIGHI, E.; ROBAINA, L. E. S. Enchentes do rio Uruguai no Rio Grande do Sul entre 1980 e 2005: Uma análise geográfica. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, 22, (1): 35-54, abril. 2010.

SAMPAIO MEDEIROS, M.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. **Emergency forecasts for water levels in the Guaíba River during the 2024 unprecedented flood in South Brazil**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), 2025.

SCHEIBE, A. C.; PICCININI, L. T. S.; BRAGA, A. D. C. **Evolução urbana do município de Lajeado: um estudo configuracional**. Revista Políticas Públicas & Cidades, Vol. 2, n. 2, 7-27p, 2015.

SCHRÖDER, J. R.; MARONEZE, A., L. G. Memórias das cheias em São Sebastião do Caí. **Revista Latino-Americana de História**, 2013.

SCHUSTER, R. C.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Scenarios of climate change effects in water availability within the Patos lagoon's basin. **Revista Brasileira de Recursos Hidricos**, v. 25, 2020.

SILVEIRA, A. L. L. **Chuvas e vazões da grande enchente de 1941 em Porto Alegre/RS**. Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul, 2020.

SILVA, E. D.; BUFFON, F. T. Avaliação econômica da operação do Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Caí entre os anos de 2009 e 2020. **Anais do II Encontro Nacional de Desastres Naturai**s, virtual, 2020.

SILVA, E. D.; MATOS, A. J. S. **Sistema de alerta hidrológico da bacia do rio Caí: relatório técnico de operação no período de novembro de 2020 a novembro de 2021**. Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 2021.

SILVA, E. D.; MATOS, A. J. S. **Relatório de operação do Sistema de Alerta Hidrológico da bacia do Rio Taquari 2022**. Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 2022.

SILVA, E. D.; MATOS, A. J. S. **Relatório de operação do Sistema de Alerta Hidrológico da bacia do rio Caí 2022**. Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2022.

SIQUEIRA, V. A. **Previsão de cheias por conjunto em curto a médio prazo: Bacia do Taquari-Antas/RS**. Dissertação de mestrado – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SIQUEIRA, V. A. et al. Previsão de cheias por conjunto a partir de previsões operacionais do EPS regional Eta na bacia do Taquari-Antas/RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 3, p. 587–602, 2016.

SGB (Serviço Geológico do Brasil), BASIL. 2024. São Sebastião do Caí (RS) registra a 3ª maior cheia da história em seis meses. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/w/sao sebastiao-do-cai-rs-registra-a-3-maior-cheia-da-historia-em-seis-meses. Acessado em 21 Dez. 2024.

SHEIKH, M. R.; COULIBALY, P. Local-and Large-Scale Hydrologic Forecast Merging through Time Series Features–Based Dynamic Weights Estimation Framework. **Journal of Hydrometeorology**, vol. 26, nº 8, p. 1201–1217, 2025.

SWINBANK, R. *et al.* The TIGGE project and its achievements. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 97, nº 1, p. 49–67, 2016.

THIELEN, J. *et al.* The European Flood Alert System-Part 1: Concept and development. **Hydrology Earth and System Science**, 2009.

TUCCI, C. E. M., PORTO, R. L. L., BERROS, M. T. L. D. **Drenagem urbana**. Porto Alegre: Ed. Da Universidade: ABRH: 428 pg, 1995.

TUCCI, C. E. M. **Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil**. Rega: revista de gestión del agua de America Latina. Santiago. Vol. 1, n. 1 (jan./jun. 2004), p. 59-73, 2004.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. Da Universidade: ABRH: 678 pg, 2007.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA: 393p, 2007.

USACE. [s.d.]. HEC-RAS 6.0 User's Manual. U.S. Army Corps of Engineers.

VIEIRA, V. P. P. B. **Estudo da relação benefício-custo das obras de proteção contra enchentes de perímetros urbanos, no vale do Rio dos Sinos.** Dissertação (Mestrado em Hidrologia Aplicada) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1970.

VITART, F.; ROBERTSON, A. W. The sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) and the prediction of extreme events. **Climate and Atmospheric Science**, v. 1, n. 1, 2018.

WMO. El Niño weakens but impacts continue. WMO, 2024. Disponível em: https://wmo.int/news/media-centre/el-nino-weakens-impacts-continue

WETTERHALL, F. *et al.* **HESS Opinions "forecaster priorities for improving probabilistic flood forecasts"**. European Geosciences Union, 2013.

World Meteorological Organization (WMO). Guidelines on the verification of hydrological forecasts. 2025.