IMPACTO DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA SEGURANÇA HIDROLÓGICA DE BARRAGENS NO SUL DO BRASIL

Hugo G. L. A. Montenegro [1]; Rodrigo C. D. Paiva [2]; Suzana M. G. L. Montenegro [3]

Abstract: Extreme climatic events have become more frequent due to human activity, altering the intensity and recurrence of hydroclimatic variables such as precipitation and river discharge. Projections indicate these events will intensify in various regions, including southern Brazil. Such changes must be integrated into dam design and safety assessments, which have traditionally relied on assumptions of climate stationarity and historical data. This shift is essential to reduce the vulnerability of communities and ecosystems to structural failures caused by climate change–exacerbated floods. This study analyses changes in annual maximum precipitation and discharge up to 2100, based on projections from 28 global climate models (GCMs) under the SSP 4.5 scenario (CMIP6). The hydrological simulations were conducted using the MGB model for dams registered in the National Dam Safety Information System (SNISB), classified by Associated Potential Hazard and located in the southern Brazilian states of Rio Grande do Sul, Santa Catarina, and Paraná. The projections show no reduction in maximum precipitation or discharge in the region for 500-, 1,000- and 10,000-year recurrence. Instead, an increase between 5% and 30% is projected for both variables. This trend affects 98.65% of dams in small basins regarding daily maximum precipitation and 100% in large basins for discharge. Higher uncertainty was observed for the near future (up to 2065), considering projections for up to 2100 and the distant future (2053–2100).

Resumo: Eventos climáticos extremos têm se tornado mais frequentes, impulsionados por atividades humanas, alterando padrões de intensidade e frequência de variáveis hidroclimáticas como precipitação e vazão. Projeções indicam a intensificação desses eventos em diversas regiões, incluindo o Sul do Brasil. Tais mudanças devem ser incorporadas ao dimensionamento e à revisão da segurança de barragens, tradicionalmente baseados na estacionariedade climática e em dados históricos. Essa atualização é essencial para reduzir a vulnerabilidade de comunidades e ecossistemas a falhas estruturais causadas por cheias intensificadas pela mudança do clima. Neste estudo, foram analisadas alterações até 2100 nas precipitações e vazões máximas anuais, com base em projeções de 28 modelos climáticos globais (GCMs), no cenário SSP 4.5 (CMIP6). As simulações hidrológicas foram realizadas com o modelo MGB para barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), classificadas quanto ao Dano Potencial Associado e localizadas nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Os resultados

1) UFRGS / TPF Engenharia: Avenida Bento Gonçalves, 9500 - Prédio 44302 - Agronomia, Porto Alegre - RS, 91501-970, (081) 99768-0991, hugogico55@gmail.com

2) UFRGS: Avenida Bento Gonçalves, 9500 - Prédio 44302 - Agronomia, Porto Alegre - RS, 91501-970, (051) 3308-6408, rodrigo.paiva@ufrgs.br

3) UFPE: Rua Acadêmico Hélio Ramos, Várzea, Recife – PE, 50740530, (81) 2126-8221, suzanam.ufpe@gmail.com

indicam que não há tendência de redução nas precipitações ou nas vazões máximas para as recorrências de 500, 1.000 e 10.000 anos. Observou-se aumento projetado entre 5% e 30% para ambas as variáveis, afetando 98,65% das barragens em pequenas bacias (precipitação) e 100% em grandes bacias (vazão). A maior incerteza nas projeções ocorreu no período de futuro próximo (até 2065), em relação aos cenários até 2100 e de futuro distante (2053-2100).

Palavras-Chave – Projeções climáticas; Segurança de barragens; Modelagem hidrológica.

1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, barragens são dimensionadas a partir de dados históricos, assumindo estacionariedade de variáveis do ciclo hidrológico. O aumento projetado para a temperatura atmosférica e superfície terrestre para as próximas décadas altera padrões de precipitação e demanda d'água atmosférica. Tais alterações hidrológicas, a partir da mudança climática, podem afetar a segurança de reservatórios, resultando no aumento de risco de danos ou falhas pela intensificação de eventos extremos.

Eventos extremos associados à mudança climática têm crescido (SUN et al., 2023). Como exemplo, pode-se citar as enchentes com consequências catastróficas observadas em maio de 2024, no Rio Grande do Sul. Esses eventos no Rio Grande do Sul trouxeram grandes reflexões e discussões no meio técnico da Engenharia e outras áreas, mas também no meio político. E boas contribuições técnico-cientificas surgiram também, a exemplo do livro publicado pela ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico), com a participação de diversos pesquisadores e técnicos (ANA, 2025).

As projeções de cenários de mudanças climáticas apontam que pode haver aumento da vulnerabilidade de comunidades a desastres causados por eventos de cheia, tendo em vista projeções de intensificação de magnitude e aumento de frequência de eventos extremos para diferentes partes do mundo.

O presente artigo apresenta análises de alterações de variáveis hidrológicas – precipitação e vazão máximas diárias anuais - em bacias no Sul do Brasil frente à mudança climática, associando-as à potencial mudança na segurança hidrológica de barragens.

2. MATERIAL E METÓDOS

Para análise do impacto da mudança climática projetada sobre a segurança hidrológica de reservatórios na Região Sul do Brasil, foram consideradas as informações cadastrais da base de dados SNISB (ANA) de barragens cadastradas quanto ao DPA – Dano Potencial Associado. Foi avaliada a alteração projetada de precipitação máxima e vazão máxima diária anual nas bacias MGB da Região, sendo comparadas as janelas estacionárias entre 2018 e 2100 e 1953 a 2014 por 28 GCMs, considerando janelas estacionárias (Brêda *et al.*, 2023; Paiva *et al*., 2024a). Adicionalmente, foram consideradas as alterações das variáveis até 2065 – futuro próximo; e entre 2053 e 2100 – futuro distante.

Foi considerado o cenário intermediário SSP2-4.5 (CMIP6) de mudança climática (PAIVA *et al.*, 2024c), e simulações no modelo hidrológico MGB-SA (SIQUEIRA *et al.*, 2018). A alteração, quando com concordância mínima de sinal (redução ou aumento) de 67%, foi associada à mudança na segurança hidrológica das estruturas, visto o entendimento de que ocorre variação na probabilidade de ocorrência do evento extremo de referência (Figura 1).

Aos processos e critérios metodológicos adotados, inclui-se a não consideração de barragens em fase de projeto, estruturas descaracterizadas, ou localizadas em área fora da zona de abrangência do MGB-SA como filtragem da base de dados SNISB.

Os reservatórios de grandes bacias, identificados manualmente como aqueles que interceptam os grandes rios representados no MGB, foram analisados quanto à mudança projetada de $Q_{max.}$ As demais barragens consideradas foram associadas como sendo em pequenas bacias - analisadas quanto à alteração projetada de P_{max} , conforme Paiva *et al.* (2024a). Este critério se baseia na escala espacial de análise do MGB-SA, em que estão representadas bacias de drenagem com área superior a 1.000 km² (COLISCHONN *et al.*, 2007).

Através do método de distribuição de probabilidade de Gumbel, com ajuste de parâmetros de escala e posição pelo método dos momentos (NAGHETTINI, PINTO, 2007), foram obtidos resultados para as bacias da Região Sul do Brasil correspondentes às barragens em análise, considerando as recorrências de 500, 1.000 e 10.000 anos para essas variáveis (Figura 2).

Cada barragem foi analisada a partir de sua classificação quanto ao Dano Potencial Associado, sendo para os TRs 500, 1.000 e 10.000 anos para as estruturas de DPA baixo, médio e alto, respectivamente. Esta escolha foi baseada nos tempos de recorrências mínimos requeridos para análises de segurança hidrológica de barragens de mineração, conforme previsto na Resolução ANM nº 95/2022. Isso se deu por este se tratar do critério mais restritivo previsto para barragens no Brasil.

A distribuição por UF das barragens analisadas, e em relação à classificação de DPA, a partir de filtragem da base SNISB (ANA, 2023), é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição das barragens analisadas, cadastradas na base de dados SNISB (filtrada)
Fonte: Adaptado de ANA, 2023

UF	Barragens em grandes bacias do MGB				Barragens em pequenas bacias do MGB				Total Geral
	DPA			Total	DPA			Total	Total
	Alto	Baixo	Médio		Alto	Baixo	Médio		
PR	18	4	2	24	57	127	86	270	294
RS	22	11		33	735	299	187	1221	1254
SC	24	6	2	32	53	173	16	242	274
Total Geral	64	21	4	89	845	599	289	1733	1822

Figura 1: Fluxograma metodológico de análise de alteração da segurança hidrológica de barragens no Brasil. Fonte: O Autor.

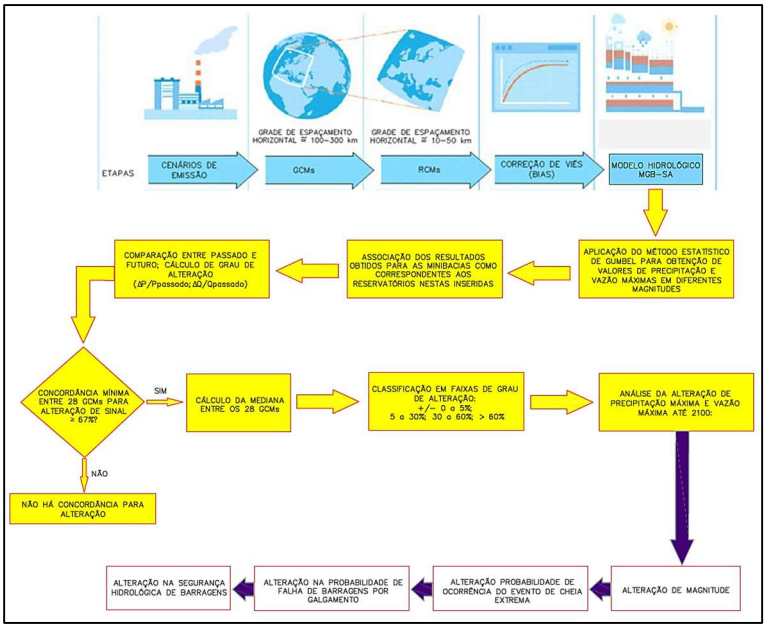
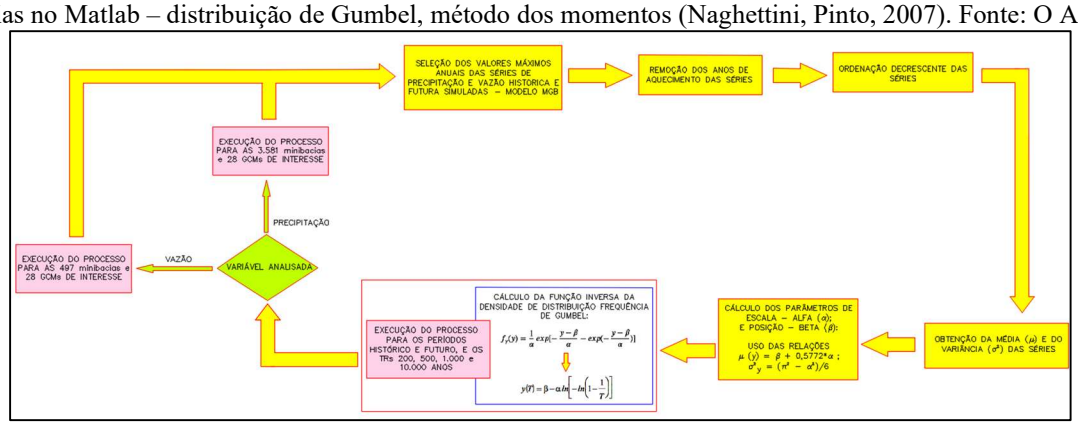


Figura 2: Fluxograma metodológico para obtenção de valores máximos anuais de precipitação e vazão máximas diárias no Matlab – distribuição de Gumbel, método dos momentos (Naghettini, Pinto, 2007). Fonte: O Autor.



3. RESULTADOS

3.1.PMAX

Para a análise de alteração projetada de P_{max} para TR 500 anos, foram consideradas apenas barragens de DPA baixo de pequenas bacias. Os resultados projetados para essa variável estão dispostos na Figura 3 para o futuro até 2100, na forma de distribuição por UF, uso principal e faixa de grau de alteração projetada.

Os resultados para as projeções de P_{max} para o TR 1.000 anos e TR 10.000 anos, considerando barragens de DPA médio e DPA alto em pequenas bacias, estão representados na Figura 4 e Figura 5.

Os resultados obtidos estão alinhados com o observado por Paiva *et al.* (2024b), de projeção de intensificação de precipitações máximas até 2100 para TRs de até 50 anos em bacias como a do Rio Uruguai (também em concordância com Brêda *et al.* (2023)); podendo superar 60% de aumento no extremo norte e extremo sul do Brasil.

Não há uma relação linear entre precipitação e vazão (BRÊDA *et al.*, 2020), visto que outros fatores influenciam nas vazões máximas de uma bacia, como umidade antecedente, alterações no uso e ocupação do solo, e implantação de reservatórios (SHARMA *et al.*, 2018).

Assim, não é possível interpretar que o aumento projetado para precipitação máxima causará aumento na vazão máxima diária. Mesmo sendo, não deve ser negligenciado o aumento projetado de P_{max} para as bacias no Sul brasileiro.

Figura 3: Distribuição de barragens DPA baixo em pequenas bacias na Região Sul – UF e uso principal. Faixa de grau alteração (%) de P_{max} TR 500 anos entre 2018-2100 em relação a 1953-2014.

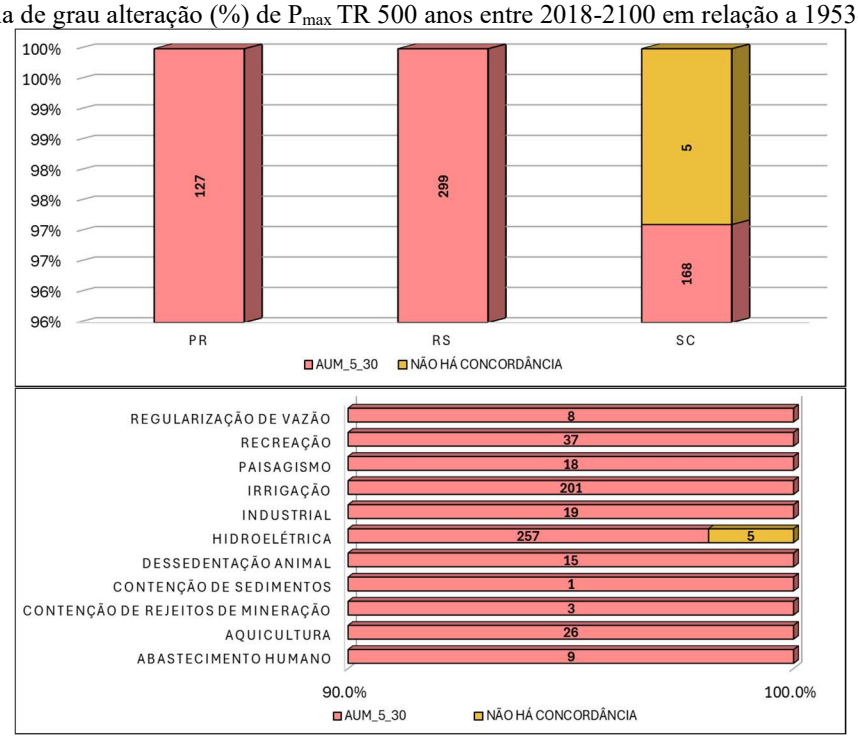


Figura 4: Distribuição de barragens DPA médio em pequenas bacias na Região Sul – UF e uso principal. Faixa de grau alteração (%) de P_{max} TR 1.000 anos entre 2018-2100 em relação a 1953-2014.

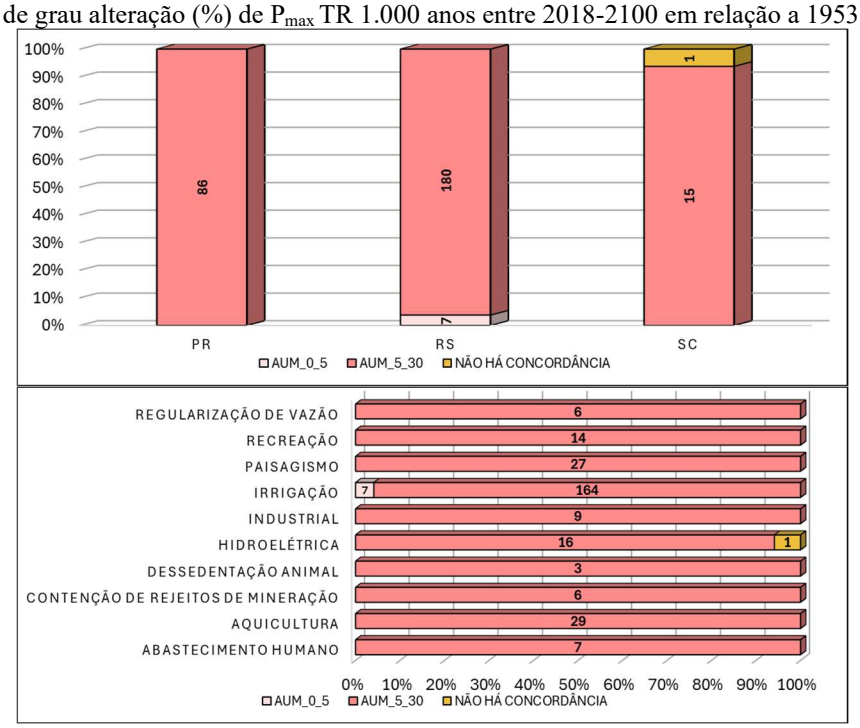
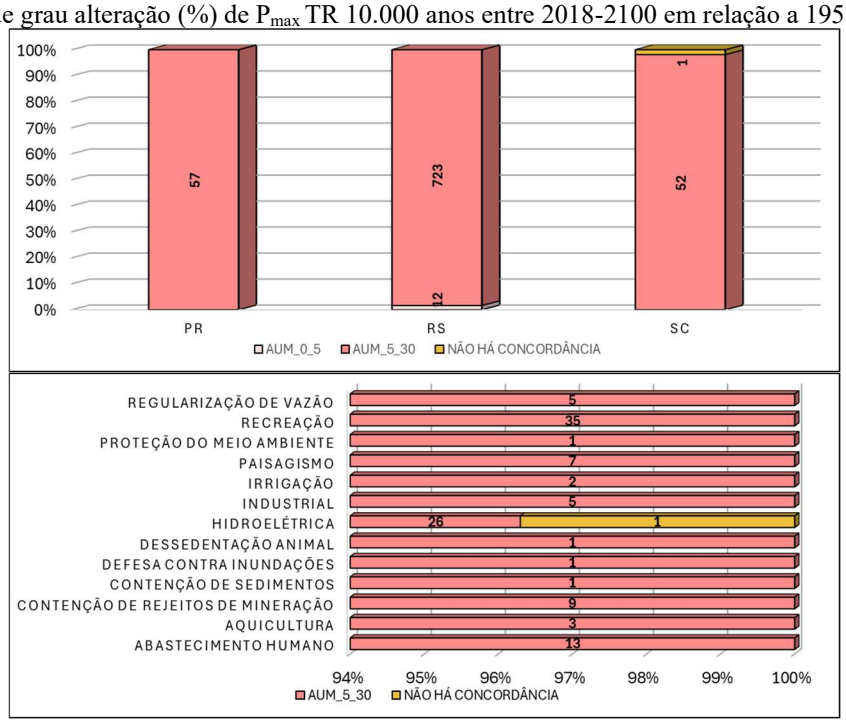


Figura 5: Distribuição de barragens DPA alto em pequenas bacias na Região Sul – UF e uso principal. Faixa de grau alteração (%) de P_{max} TR 10.000 anos entre 2018-2100 em relação a 1953-2014.



3.2.QMAX

Para a análise de alteração projetada de Q_{max} para TR 500 anos, foram consideradas apenas barragens de DPA baixo de grandes bacias. Os resultados projetados para essa variável estão dispostos na Figura 6 para o futuro até 2100, na forma de distribuição por UF, uso principal e faixa de grau de alteração projetada.

Os resultados para as projeções de Q_{max} para o TR 1.000 anos e TR 10.000 anos, considerando barragens de DPA médio e DPA alto em grandes bacias, estão representados na Figura 7 e Figura 8.

Essas observações estão em consonância com o identificado por Hirabayashi *et al.* (2021), de projeção de aumento de vazão máxima TR 100 anos para parte do território brasileiro; e por Brêda *et al.* (2023), de aumento provável de vazão máxima diária para o TR 44 anos para pelo menos 7% das bacias na América do Sul. Projeções de aumento significativo também foram observadas em regiões brasileiras para os TRs 50 anos e 2 anos por Paiva *et al.* (2024b). Há um consenso entre esses autores para projeções de aumento de vazão máxima para a Região Sul do Brasil, assim como observado nas análises apresentadas neste artigo.

Figura 6: Distribuição de barragens DPA baixo em grandes bacias na Região Sul – UF e uso principal. Faixa de grau alteração (%) de Q_{max} TR 500 anos entre 2018-2100 em relação a 1953-2014.

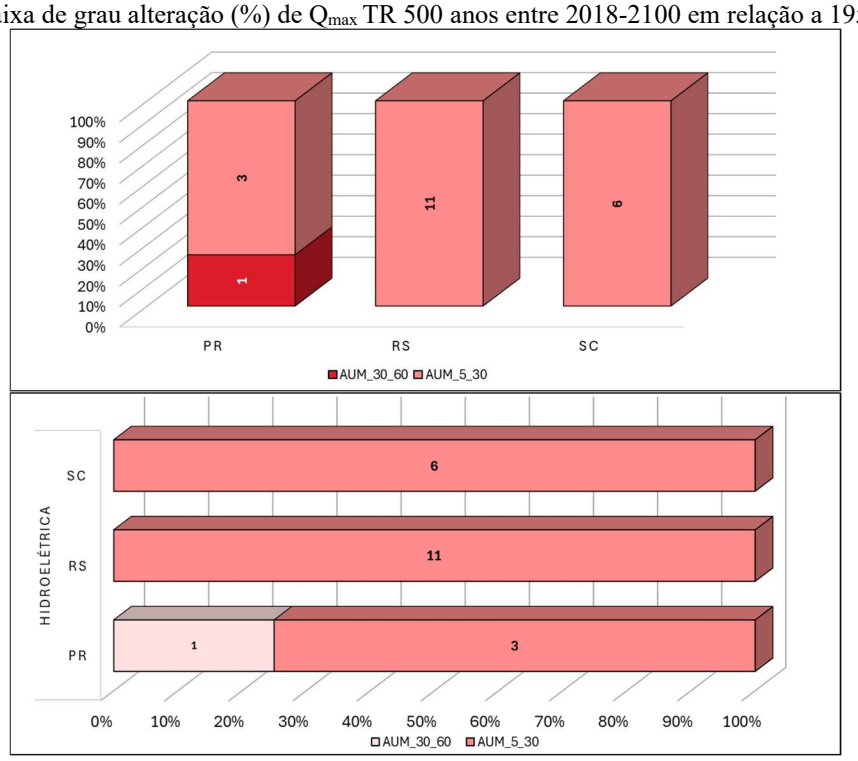


Figura 7: Distribuição de barragens DPA médio em grandes bacias na Região Sul – UF e uso principal.
Faixa de grau alteração (%) de Q_{max} TR 1.000 anos entre 2018-2100 em relação a 1953-2014.

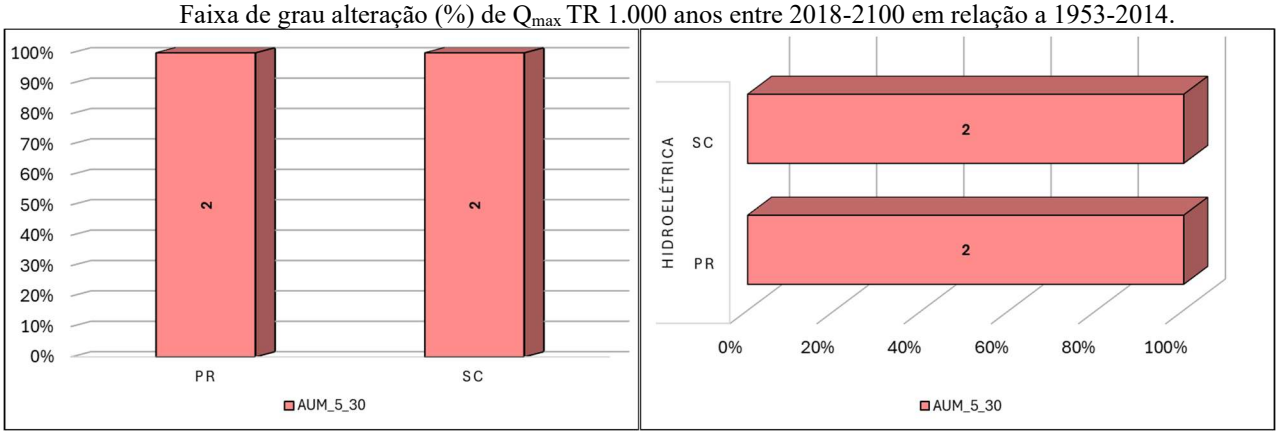
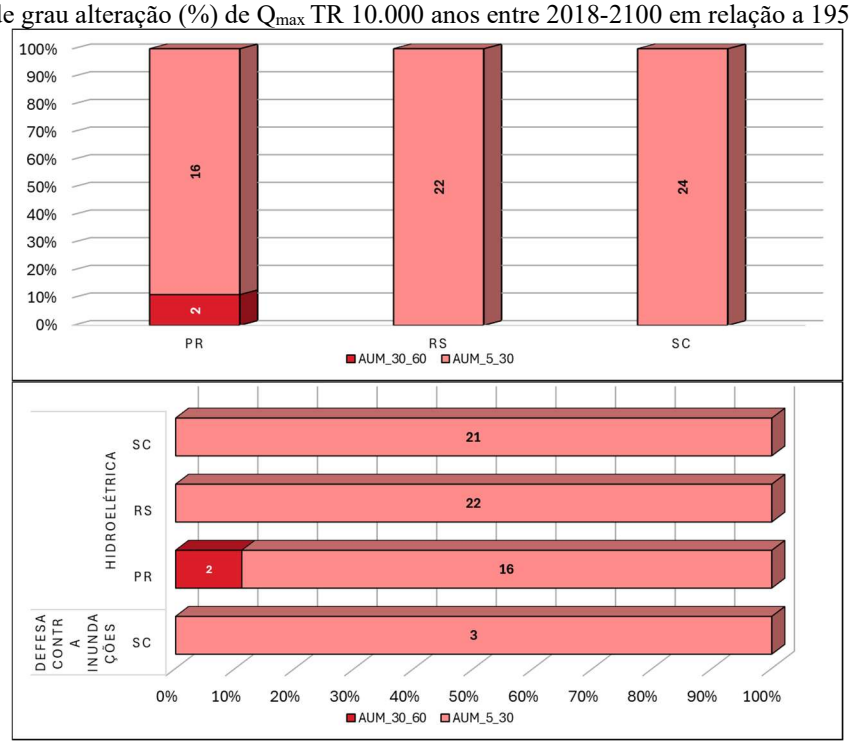


Figura 8: Distribuição de barragens DPA alto em grandes bacias na Região Sul – UF e uso principal.
Faixa de grau alteração (%) de Q_{max} TR 10.000 anos entre 2018-2100 em relação a 1953-2014.



Destaca-se que foi observada maior ocorrência de barragens em bacias na região Sul que não apresentaram concordância mínima de 66,67% entre os 28 GCMs para projeção de alteração de sinal das variáveis hidrológicas, quando analisado o futuro próximo (até 2065), comparativamente ao futuro distante (entre 2053 e 2100), e à janela temporal de futuro até 2100.

Considerando as barragens analisadas em pequenas bacias do MGB (1.732), 0,83% dessas não tiveram concordância mínima para projeção de alteração de precipitação até 2100. Para os futuros próximo e distante, isso ocorreu para 11,25% e 3,88%, respectivamente.

Para as barragens em grandes bacias (178), apenas o futuro próximo apresentou não concordância mínima para projeção de alteração de sinal de vazão máxima diária anual, correspondendo a 9,09% dessas.

4. CONCLUSÕES

Almejando identificar a potencial mudança na segurança hidrológica de barragens na Região Sul do Brasil frente à mudança climática, foram analisadas as alterações projetadas de precipitação e vazão máximas diárias anuais entre o período 2018 a 2100 em relação a 1953 a 2014, com a adoção de projeções de um *ensemble* de 28 GCMs do CMIP6 para o cenário intermediário (SSP 4.5), e dados de simulação hidrológica-hidrodinâmica do MGB-SA.

A partir dos resultados obtidos, destaca-se projeções de:

- Aumento acima de 5% de precipitação máxima até 2100 para 98,65% barragens analisadas em pequenas bacias na Região Sul (1.707/1.732);
- Aumento acima de 5% de vazão máxima até 2100 para a totalidade de barragens analisadas em grandes bacias na Região Sul (178);
- Ausência de redução precipitação e vazão máxima para as barragens analisadas considerando os períodos futuro até 2100, até 2065 (futuro próximo), e entre 2053 e 2100 (futuro distante);
- Maior incerteza para alteração de precipitação e vazão máxima considerando os períodos de futuro próximo, em relação às comparações até 2100 e futuro distante.

Esses resultados demonstram que é projetada redução da segurança hidrológica para maior parte das barragens do território nacional, analisadas a partir das projeções de aumento de precipitação e vazão máximas. Apesar das incertezas intrínsecas às projeções e simulações, esta observação deve ser incentivo aos tomadores de decisão e empreendedores para incorporar os efeitos da mudança climática na legislação (PNSB) e normativas (OFSBs) ligadas à segurança de barragens; e na revisão de dimensionamento de estruturas no território nacional, com desenvolvimento de critérios metodológicos padronizados. Adicionalmente, devem ser realizadas maiores investigações para analisar o efeito do aumento de magnitude de cheias sobre as barragens do território, em menor escala, com simulação do trânsito no reservatório, e considerando cheias de duração variada.

As análises de projeções de mudança climática e o impacto no ciclo hidrológico devem ser fruto de atualização continua, a partir da elaboração de novos estudos IPCC, novas investigações da comunidade técnico-científica, e o desenvolvimento de novas metodologias de referência.

AGRADECIMENTOS – Os autores agradecem ao IPH UFRGS - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, ao Grupo de Pesquisas HGE – Hidrologia em Grande Escala, e à ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento pelo apoio técnico científico e disponibilização de dados; à TPF Engenharia, pelo incentivo para desenvolvimento do mestrado do primeiro autor; ao CNPq, pelas bolsas PQ dos segundo e terceiro autores, e pelo financiamento INCT ONSEADAPTA (Proc. 406919/2022-4).

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA (BRASIL). (2025). *"Manuais do Empreendedor"*. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/publicacoes/ManualEmpreendedor. Acesso em: 05/01/2025 às 20:10.

BRÊDA, J. P. L.; DE PAIVA, R. C. D.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W. (2023). "*Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers"*. Journal of Hydrology, 619, 129284.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; DA SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. (2007). "*The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling"*. Hydrological Sciences Journal, 52(5), 878-895.

HIRABAYASHI, Y.; TANOUE, M.; SASAKI, O.; ZHOU, X.; YAMAZAKI, D. (2021). "*Global exposure to flooding from the new CMIP6 climate model projections"*. Scientific reports, 11(1), 3740.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. D. A. (2007). *Hidrologia estatística*. Belo Horizonte, CPRM.

PAIVA, R.; COLLISCHONN, W.; MIRANDA, P.; PETRY, I.; DORNELLES, F.; GOLDENFUM, J.; FAN, F.; RUHOFF, A.; FAGUNDES, H. (2024a). *"Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: Chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil"*. Nota Técnica Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; MIRANDA, P. T.; FAGUNDES, H.O.; W.; KOLLING, A.; CASTRO, L.; ROSSI, J.; MATTE, G.; LAIPELT, L.; ALVES. W, PETRY. I. (2024b). *"Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional. 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].

SIQUEIRA, V.A.; PAIVA, R. C. D.; FLEISCHMANN, A. S.; FAN, F. M.; RUHOFF, A. L.; PONTES, P. R. M.; *et al.* (2018). "*Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in South America"*. Hydrology and Earth System Sciences, 22(9), 4815–4842. https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018.

SHARMA, A.; WASKO, C.; LETTENMAIER, D. P. (2018). "*If precipitation extremes are increasing, why aren't floods?"*. Water resources research, 54(11), 8545-8551.

SUN, J.; CHEN, W.; HU, B.; XU, Y. J.; ZHANG, G.; WU, Y.; J, B, SONG, Z. (2023). "*Roles of reservoirs in regulating basin flood and droughts risks under climate change: Historical assessment and future projection"*. Journal of Hydrology: Regional Studies, 48, 101453.