

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ALTERAÇÕES DE VAZÃO EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO

Mino Viana Sorribas¹; Murilo Brazzalli²; Diogo Costa Buarque³; Neyval Costa Reis Junior⁴

Abstract: This study evaluated the impacts of climate change on streamflow estimates in the main river basins of the state of Espírito Santo, Brazil, through hydrological modeling based on projections from 26 CMIP6 climate models. Historical series and future projections of precipitation and associated climate variables were analyzed under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. Climate data underwent bias correction and were then used as input to the MGB hydrological model developed for different hydrographic regions of the state, in daily timesteps. The analysis focused on the percentage variation in minimum, mean, and maximum flows between historical and future periods. Results show high agreement among models regarding the reduction in minimum flows, indicating an increased risk of intense and prolonged hydrological droughts, which may impact multiple sectors, particularly public water supply. Although more uncertain, an emergent signal towards increased maximum flows was observed in basins located in the northern and southern regions of the state. These findings reinforce the need to incorporate climate change scenarios into water resources planning and the development of adaptation policies that address both the potential for water scarcity and the intensification of flood events.

Resumo: Este estudo avaliou os impactos das mudanças climáticas em estimativas de vazões nos principais rios do estado do Espírito Santo por meio de modelagem hidrológica, considerando projeções de 26 modelos climáticos do CMIP6. Foram utilizadas séries históricas e projeções futuras de precipitação e variáveis climáticas associadas aos cenários SSP2 4.5 e SSP5 8.5, em três janelas de horizonte futuro. Os dados climáticos passaram por correção de viés e, em seguida, foram utilizados como entrada para o modelo hidrológico MGB preparado para diferentes regiões hidrográficas do estado, em intervalo de tempo diário. A análise centrou-se na comparação percentual entre os períodos futuro e histórico, com foco nas alterações das vazões mínimas, médias e máximas. Os resultados indicam alta concordância entre os modelos quanto à redução das vazões mínimas, o que sugere risco evidente de secas hidrológicas intensas e prolongadas, que pode impactar diversos setores como o abastecimento público e irrigação. Embora mais incerto, observou-se também um sinal emergente de aumento nas vazões máximas em bacias localizadas ao norte e ao sul do estado. Esses resultados fornecem subsídios e reforçam a necessidade de incorporar cenários climáticos no planejamento dos recursos hídricos e na formulação de políticas de adaptação que considerem o potencial de escassez hídrica e cheias mais intensas.

Palavras-Chave – Cenários Climáticos; Vazões Mínimas e Máximas; Estado do Espírito Santo

¹ Labhig, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES; Núcleo de Análises Ambientais, Centro de Pesquisa Inovação e Desenvolvimento (mino.sorribas@gmail.com)

² Labhig, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES; (murilo.b.rodrigues@ufes.br)

³ Labhig, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES; Núcleo de Análises Ambientais, Centro de Pesquisa Inovação e Desenvolvimento (diogo.buarque@ufes.br)

⁴ Núcleo de Pesquisa em Qualidade do Ar, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES; Núcleo de Análises Ambientais, Centro de Pesquisa Inovação e Desenvolvimento (neyval.reis@ufes.br)

INTRODUÇÃO

O Espírito Santo passou por grandes mudanças econômicas e sociais nas últimas décadas, desde uma economia baseada predominantemente no setor primário, com a monocultura do café, até a chegada de grandes indústrias, culminando numa economia fortemente dependente da água. O Plano Estadual de Recursos Hídricos do Espírito Santo apresenta um panorama detalhado e destaca que grande parte da disponibilidade hídrica já está comprometida com as demandas atuais. O estado possui clima quente e úmido, com temperaturas médias acima dos 18°C e precipitação, ou quantidade de chuva média anual, variando entre 900 e 1.700 milímetros. Nas regiões norte e noroeste do Estado a baixa incidência de chuvas contribui para a deficiência do balanço entre demanda e oferta, e conflitos de uso para irrigação (AGERH, 2018). Na Região Metropolitana da Grande Vitória, onde se concentra a maior parte da população capixaba, a falha de atendimento é agravado em situações de seca, devido a demanda de água muito significativa para o abastecimento público. Nas bacias do Sul do Estado, inundações tem sido observadas frequentemente, com prejuízos sociais e econômicos. Essas situações têm se agravado nos últimos anos e a perspectiva de aumento do consumo de água no futuro já reforçam a necessidade da gestão de recursos hídricos no Estado.

Além disso, o entendimento das mudanças climáticas e seus efeitos de alterações dos regimes hidrológicos, seja nos impactos em disponibilidade e variabilidade, é importante para diferentes setores estratégicos do país, como os setores hidrelétrico, agricultura e abastecimento urbano, provocando impactos diretos sobre a disponibilidade e a variabilidade dos recursos hídricos (Neto, Dela Costa e Buarque, 2023). Neste contexto, o uso de ferramentas de simulação hidrológica contribui para compreender de forma mais integrada as respostas do sistema hidrológico regional frente às pressões climáticas futuras. Essa abordagem foi utilizada em muitos estudos realizados nas últimas décadas sobre a disponibilidade hídrica em cenários de mudanças climáticas em bacias hidrográficas do Brasil e da América do Sul (Adam & Collischonn, 2013; Sorribas et al. 2016; Schuster & Fan, 2020; Breda *et al.* 2020; Miranda *et al.* 2021; Dela Costa *et al.* 2022). Na bacia hidrográfica do rio Doce, que apresenta nascentes em Minas Gerais e Espírito Santo (trecho baixo), Dela Costa *et al.* (2022) mostrou cenários futuros em que há redução significativa de vazões médias e mínimas, resultantes da alteração do balanço hídrico, apontando uma intensificação das pressões sobre os recursos hídricos e à segurança hídrica. Os estudos com modelagem hidrológica permitem realizar estimativas para o regime de vazões do futuro e, portanto, oferecem subsídios importantes para o planejamento e a gestão da segurança recursos hídricos, além de contribuir para a adaptação de políticas públicas voltadas para adaptação e redução de riscos climáticos.

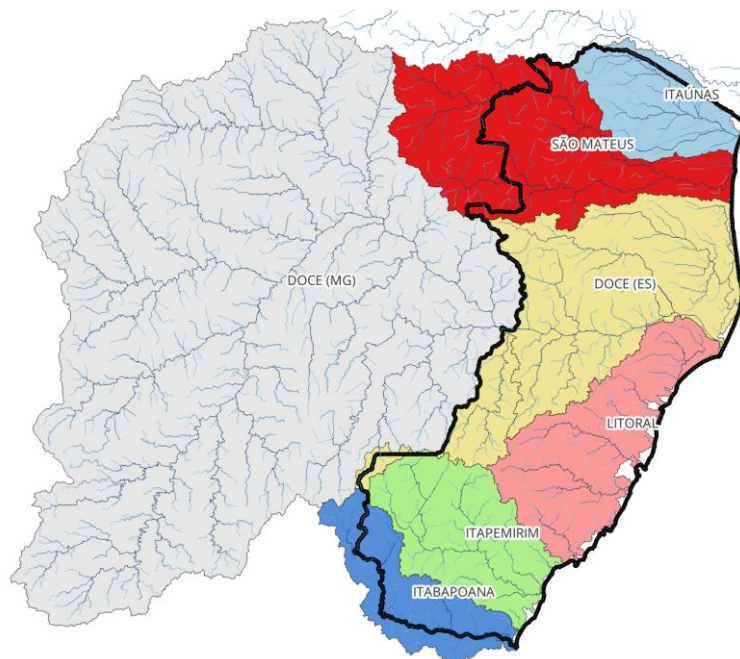
Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo avaliar os impactos potenciais de diferentes projeções de mudança climática nas vazões dos principais rios das bacias hidrográficas que conformam o estado do Espírito Santo. Para tanto, utilizou-se o modelo MGB para realizar a simulação hidrológica de cenários histórico e futuros (SSP2 4.5 e SSP5 8.5) utilizando projeções de 26 modelos climáticos globais do CMIP6. que comparadas às simulações dos cenários do período histórico permitiram analisar as alterações na magnitude vazões médias, máximas e mínimas interanuais.

METODOLOGIA

O modelo hidrológico semi-distribuído MGB (Collischonn et al. 2007; Paiva, 2013; Pontes, 2016; Siqueira et al. 2018) foi utilizado para simular as vazões em rios das bacias hidrográficas no estado do Espírito Santo, apresentadas na Figura 1. A aplicação foi realizada a partir do aprimoramento do modelo regional utilizado para diagnóstico de secas, com suporte de postos fluviométricos de 200 a 70.000 km² (mediana ~1.000 km²), em discretização espacial de 10 km²

(Baldotto, 2022) e considerando os dados diários de precipitação e vazão da base de dados do CAMELS-BR 1.2 (Chagas et al. 2025) e Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) derivadas da cobertura da terra da coleção 9 do MapBiomas (Sorribas et al. 2024).

Figura 1 – Localização das principais bacias hidrográficas do estado do Espírito Santo (linha preta delimita o estado)



As simulações futuras foram conduzidas a partir de dados climáticos de 26 modelos do CMIP6, considerando os cenários de emissão SSP2 4.5 e SSP5 8.5. Para garantir a representatividade das projeções hidrológicas, foi aplicada a técnica de correção de viés Quantile Delta Mapping (QDM) para a precipitação diária. Conforme descrito por Cannon et al. (2015), o procedimento foi realizado utilizando uma janela móvel de ± 15 anos e deslocamento de ± 1 mês em relação a cada mês-alvo, de forma a preservar a variabilidade intra-anual e as tendências interanuais projetadas pelos modelos climáticos. No caso da temperatura do ar, radiação incidente, velocidade do vento e umidade relativa, a correção foi realizada de maneira similar e simplificada, pois as observações utilizadas foram as normais climatológicas e não séries temporais.

Após a aplicação do QDM, os dados dos forçantes corrigidos foram utilizados no modelo hidrológico para simular as vazões no período histórico (1979-2014) e no período futuro (2015-2085), para cada GCM e cenário SSP. As análises foram realizadas pela comparação das vazões médias, máximas e mínimas interanuais entre o período futuro e histórico, pelas alterações percentuais. Após o cálculo dos valores das alterações (%) para cada modelo, os resultados foram unificados pela mediana (entre modelos do conjunto), fornecendo um valor único para cada local simulado. Apesar da mediana indicar a tendência central do conjunto de modelos, dois aspectos adicionais foram considerados: (i) se os modelos concordam no sinal da alteração (aumento ou redução) e (ii) se as alterações obtidas são significativas frente a variabilidade simulada no período histórico (diferença entre as distribuições amostrais). A diferença entre as distribuições foi realizada com o teste de Mann-Whitney-U (ou Wilcoxon rank-sum test) com $\alpha < 0.05$ (Wilks, 2006). Assim, a abordagem permitiu a avaliação integrada de múltiplos modelos climáticos e a quantificação do grau de concordância entre eles quanto ($\geq 2/3$ dos modelos) os efeitos de mudanças climáticas nas vazões futuras.

RESULTADOS

Neste estudo as alterações percentuais nas vazões simuladas entre cenários foram utilizadas, pois essa abordagem reduz efeitos de incertezas sistemáticas (i.e. estruturais) associadas dos modelos climáticos, além de destacar os efeitos das mudanças climáticas no regime hidrológico. Além disso, facilita a interpretação e compreensão direta para gestão e planejamento, permitindo a comparabilidade entre bacias e cenários.

A figura 2 apresenta os resultados de simulação das alterações percentuais nas vazões máximas, médias e mínimas (interanuais) do cenário SSP245, considerando a janela futura de 2015-2085 (em relação a referência, período histórico, de 1979 a 2014). Para cada ponto da rede de drenagem foi obtido o valor da alteração de cada modelo do CMIP6, sendo resumido e ilustrado pela mediana entre modelos. Isso também foi realizado para o cenário SSP585 que é apresentado na figura 2. Para o cenário SSP245, observa-se um aumento de vazões máximas, entre +5 e +20%; e uma redução no caso das vazões médias e mínimas, entre -5 e -20%, especialmente na região costeira e nordeste do estado. Os padrões para o cenário SSP585 são bastante similares, mas, em geral, com maior intensidade das alterações e abrangência espacial (Figura 3). Em geral, há um sinal emergente de redução das vazões médias e mínimas na maior parte do estado, e aumento de vazões máximas nas bacias ao norte e sul.

Essa análise sintetiza e permite uma ampla perspectiva do efeito das mudanças climáticas nas vazões ribeirinhas das bacias hidrográficas do Espírito Santo, corroborando estudos climáticos anteriores realizados com modelos climáticos regionais e/ou do CMIP5 (Reis Jr. et al. 2023).

Figura 2 – Alterações (%) na vazão máxima, média e mínima no cenário SSP245– mediana do ensemble de GCMs

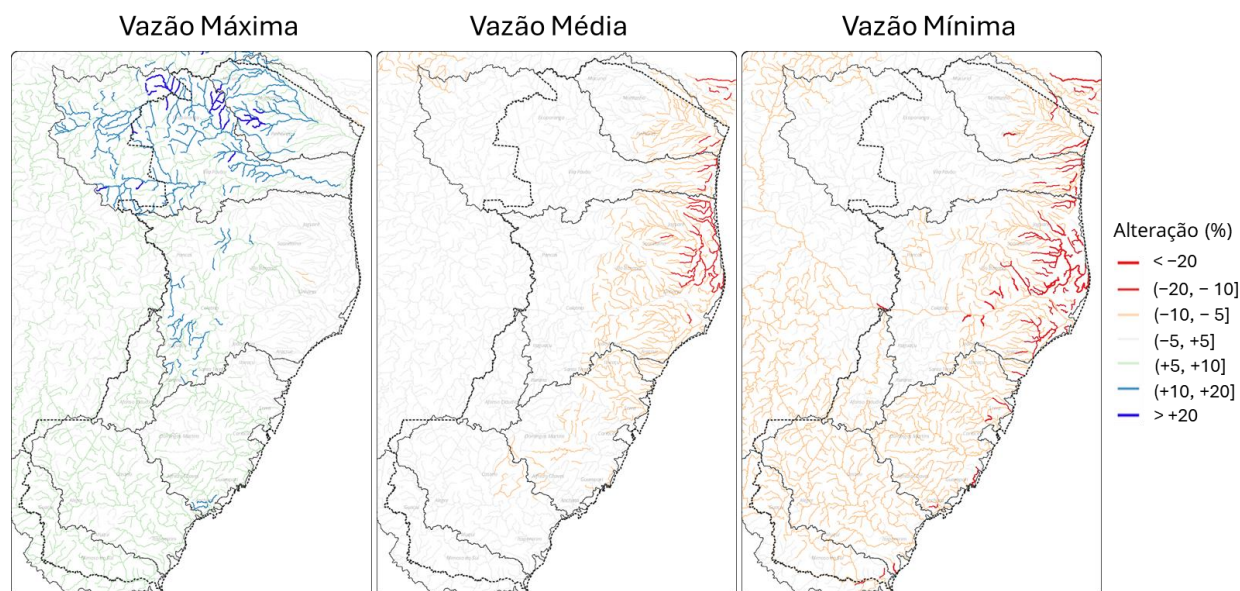
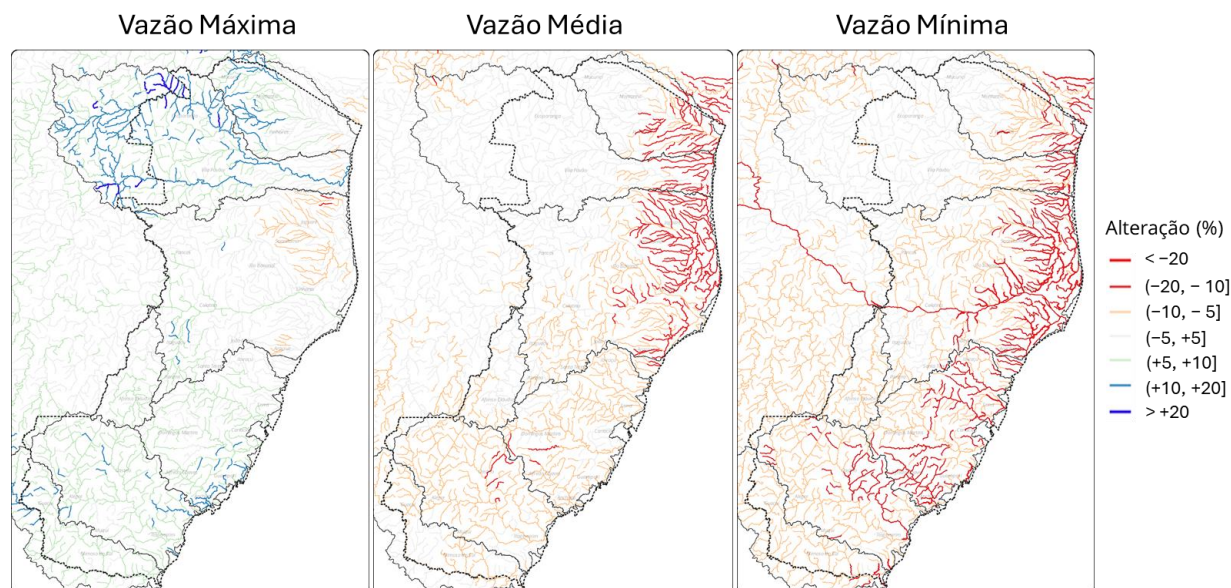


Figura 3 – Alterações (%) na vazão máxima, média e mínima no cenário SSP585– mediana do ensemble de GCMs



Para aprofundar a análise, nas figuras 4 e 5 são apresentadas as alterações nos cenários SSP245 e SSP585, respectivamente, considerando diferentes janelas de horizonte futuros: 2015-2045, 2045-2065, 2065-2085. Nesse caso, inclui-se além das alterações (%), mediana do conjunto de modelos) um sombreamento para os locais em que pelo menos 16 modelos apresentaram concordância de aumento (azul) ou redução (vermelho). A tonalidade em vermelho mais forte indica quando a série temporal do horizonte futuro apresenta distribuição dos valores significativamente inferior àquela obtida para o período histórico, sendo marcante para as vazões mínimas.

Os resultados obtidos apresentam um sinal consistente para a redução nas vazões mínimas no futuro em grande parte do território capixaba, e mais robusto para o horizonte de 2065-2085. Essa redução pode ampliar significativamente o risco de ocorrência de secas hidrológicas mais intensas e prolongadas, afetando diretamente a segurança hídrica de populações urbanas e rurais, além da disponibilidade de água para a irrigação e a manutenção de ecossistemas aquáticos. Nesse sentido, é importante avançar nas estratégias atuais de alocação e conservação dos recursos hídricos, bem como a ampliação de ações voltadas à gestão da demanda e ao reúso da água.

Embora o grau de alteração das vazões máximas não tenha sido significativo no conjunto de modelos, os resultados apontam para um sinal emergente de aumento das vazões máximas em algumas regiões, principalmente em bacias localizadas ao norte e ao sul do estado. A discordância entre modelos também é uma informação a ser considerada, pois cenários mais incertos também reforçam a necessidade de atenção contínua. Portanto, embora essa situação traga uma dificuldade adicional no direcionamento de recursos apropriados, os esforços de preparação para cheias mais intensas e seus efeitos em áreas urbanizadas e rurais, bem como seus efeitos na infraestrutura não devem ser desprezados.

É importante destacar que as simulações de vazão foram realizadas em escala regional, sendo mais relevantes na avaliação dos efeitos das mudanças climáticas numa perspectiva ampla dos recursos hídricos estaduais. Principalmente no aspecto das vazões máximas, é importante considerar que esse estudo não aborda os efeitos em escala urbana, por exemplo, na microdrenagem em que o tempo de concentração das bacias são pequenos e onde a intensificação de chuvas extremas pode ter maior efeito nas vazões de pico. Portanto, embora os resultados indiquem impactos nas vazões considerando escala temporal diária, o estado apresenta muitos problemas com eventos dentro do dia. As suas características orográficas impactam a formação de chuvas e eventos extremos de curta

duração têm se intensificado e gerado impactos devido aos grandes volumes de chuva em pouco tempo. A mesma limitação pode ser destacada nos aspectos e controles locais necessários para o desenvolvimento e ocorrência de enxurradas, não capturados na modelagem hidrológica dessa escala.

Figura 4 – Alterações (%) em vazões máximas, médias e mínimas (interanuais) e concordância no cenário SSP24.5

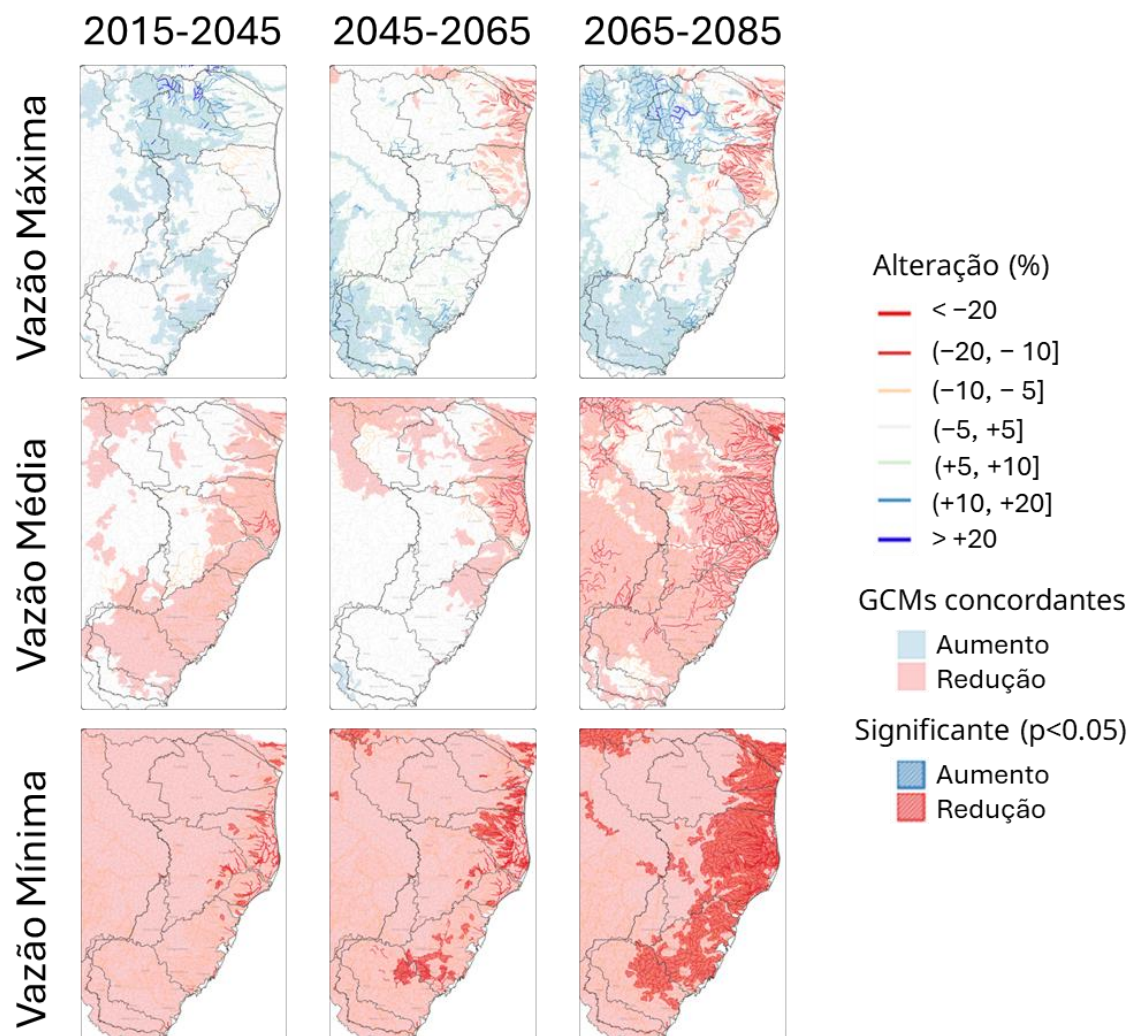
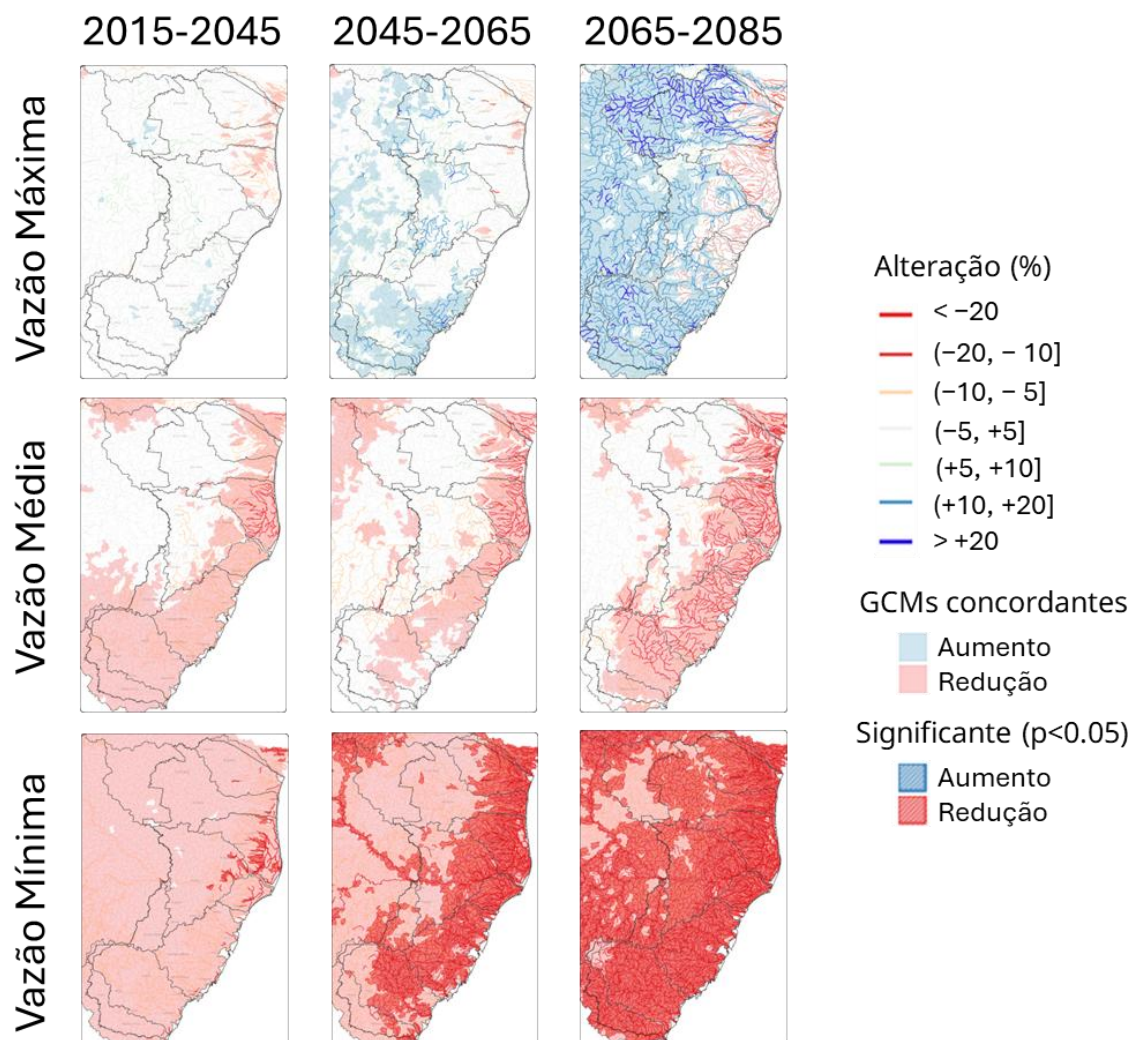


Figura 5 – Alterações (%) em vazões máximas, médias e mínimas (interanuais) e concordância no cenário SSP5 8.5



Por fim, o Plano Estadual de Recursos Hídricos (AGERH, 2017) já prevê aumento de demanda pela água ao longo do seu horizonte e, portanto, os cenários futuros que indicam redução de vazões mínimas certamente antecipam questões relacionadas à vazões de referência e outorgas de recursos hídricos, mas também da necessidade de ações de adaptação aos cenários futuros de mudanças climáticas no estado, relacionadas a ocorrência de secas. Nesse contexto, o estado tem desenvolvido o seu Plano de Adaptação às Mudanças Climáticas (<https://impactoclima.ufes.br/plano-de-adaptacao-mudancas-climaticas-do-espirito-santo>), um documento estratégico elaborado para identificar e planejar ações que promovam a sua capacidade adaptativa frente aos impactos das mudanças climáticas.

CONCLUSÃO

Este trabalho reforça a importância da modelagem hidrológica como uma ferramenta de suporte estratégica para a tomada de decisão em cenários de incerteza climática, sobretudo com base em dados de modelos climáticos modernos. Os resultados deste estudo reforçam a urgência de

integrar as projeções climáticas e hidrológicas nos instrumentos de planejamento e gestão de recursos hídricos. O forte indicativo de redução das vazões ribeirinhas mínimas representa uma ameaça concreta à segurança hídrica, e deve ser considerada nas políticas de outorga, nos planos diretores de bacias hidrográficas e na definição de zonas prioritárias para conservação e uso racional da água. A antecipação desses riscos é fundamental para evitar colapsos durante períodos críticos e garantir o abastecimento humano, considerando um clima em transformação.

A coexistência de cenários com redução de disponibilidade hídrica e aumento do risco de inundações destaca os desafios em promover a articulação e flexibilidade dos sistemas de gestão, considerando múltiplos riscos climáticos. É necessário fortalecer a segurança hídrica diante das incertezas climáticas exige não apenas melhores dados e modelos, mas também capacidade institucional para transformar esse conhecimento em ações concretas. Assim, a avaliação das alterações de vazões como parte das estratégias de planejamento baseadas em cenários futuros é essencial para antecipar riscos à segurança hídrica e orientar estratégias de resiliência, especialmente em áreas críticas para a produção agrícola e o abastecimento humano.

Nesse contexto, o estado está desenvolvendo seu Plano de Adaptação Climáticas, definindo ações que permitam se preparar para enfrentar os desafios decorrentes de eventos climáticos extremos, como secas, enchentes, ondas de calor e elevação do nível do mar, além de mitigar os efeitos adversos que essas mudanças podem causar sobre a saúde pública, infraestrutura, agricultura, economia, segurança alimentar e biodiversidade.

REFERÊNCIAS

- ADAM, K. N.; COLLISCHONN, W. (2013) “*Análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão na bacia hidrográfica do rio Ibicuí*”. RBRH: revista brasileira de recursos hídricos. Porto Alegre, RS. Vol. 18, n. 3 (jul/set. 2013), p. 69-79.
- BALDOTTO, J.B. (2022) “*Avaliação do Déficit Hídrico na Região Hidrográfica do Estado do Espírito Santo*”. 175p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.
- BRÊDA, J.P.F, et al. (2020) “*Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections.*” *Climatic Change* 159.4 (2020): 503-522.
- CANNON, A. J.; STEPHEN R. S., TREVOR Q. M (2015) “*Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?*.” *Journal of Climate* 28, no. 17 (2015): 6938-6959.
- 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.
- CHAGAS, V. B. P. et al. (2025) “*CAMELS-BR: hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil*”, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 2075–2096, <https://doi.org/10.5194/essd-12-2075-2020>.
- DELA COSTA, F. P., BUARQUE, D. C., BRÊDA, J. P. L. F., FÖEGER, L. B. (2022) “*Impact of climate change on the flow of the Doce River basin*”. RBRH: revista brasileira de recursos hídricos, v. 27, e34, 14p. doi:10.1590/2318-0331.272220220069

MIRANDA, P. T.; PAIVA, R. C. D. D.; GAMA, C. H. D. A.; BRÊDA, J. P. L. F. (2023) *River discharge in South America: agreement and contradictions between recent alteration and projected changes*. RBRH: revista brasileira de recursos hídricos. Porto Alegre, RS, agosto, v28:e18.

NETO, A.M.; COSTA, F.P.D.; BUARQUE, D.C. (2023) “*Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos*” in: REIS JUNIOR, N.C.; NOBRE, C.A.; SANTOS, J.M.; PEZZOPANE, S.E.M. (2023) *Mudanças Climáticas – Efeitos Sobre o Espírito Santo*. 1ª Ed. Paco Editorial. Setembro de 2023, Jundáí-SP.

PAIVA R.C.D.; BUARQUE D.C.; COLLISCHONN W. et al (2013) “*Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin.*” *Water Resour Res*, 49:1226–1243. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20067>

PONTES, P. R. M.; FAN, F. M., FLEISCHMANN; A. S., et al. (2017) “*MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open-source GIS*”. *Environmental Modelling & Software*, 94, 1-20.

REIS JUNIOR, N.C.; NOBRE, C.A.; SANTOS, J.M.; PEZZOPANE, S.E.M. (2023) “*Mudanças Climáticas – Efeitos Sobre o Espírito Santo*”. 1ª Ed. Paco Editorial. Setembro de 2023, Jundáí-SP.

SCHUSTER, R. C.; Fan, F. M.; Collischonn, W. (2020). “*Scenarios of climate change effects in water availability within the Patos Lagoon’s Basin*”. RBRH: revista brasileira de recursos hídricos. Porto Alegre, RS, fevereiro, v.25:e9

SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE – SEAMA E AGÊNCIA ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS – AGERH. (2018). “*Plano Estadual de Recursos Hídricos do Espírito Santo – PERH*”. Disponível em: <https://perh.es.gov.br/>

SIQUEIRA, V.A., PAIVA, R.C.D., FLEISCHMANN, A.S. et al (2018) “*Toward Continental Hydrologic– Hydrodynamic Modeling in South America*”. 1–50. doi:10.5194/hess-2018-225

SORRIBAS, M. V.; PAIVA, R. C.; MELACK, J. M. et al. (2016). “*Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin*”. *Climatic change*, 136(3), 555-570.

SORRIBAS, M.V.; RODRIGUES, M. B.; BUARQUE, D.C. et al. (2024) “*Um Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica para Aplicação Em Modelagem Hidrológica Em Bacias Hidrográficas no Estado do Espírito Santo*” In: *Anais do II FluHidros e XVI ENES*, Curitiba, 2024.

WILKS, D. S. (2006) *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Second Edition. Academic press, 2006.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Núcleo de Análises Ambientais do Centro de Pesquisa Inovação e Desenvolvimento, a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), o grupo de pesquisa LabHig (Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo) pelo apoio, recursos e laboratório para elaboração dos estudos.