

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

PROJEÇÕES HIDROLÓGICAS EM GRANDES BACIAS: UMA ANÁLISE DOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA ALTA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Felipe Pereira Dias¹ ; Daniel Andres Rodriguez²

Abstract: Water availability in a watershed is directly related to its geomorphological, climatic, and land use characteristics. Changes in rainfall patterns, intensified by climate change and human activities, have significantly altered the hydrological dynamics of watersheds. The Upper São Francisco River Watershed holds major socioeconomic and environmental importance, being essential for water supply and energy generation. Hydrological modeling emerges as a key tool for assessing the potential impacts of these changes by simulating different climate and land use scenarios. This study aimed to model the watershed from its headwaters to the Três Marias Hydropower Plant, using the Distributed Hydrological Model developed by the National Institute for Space Research (MHD-INPE). Geomorphological and hydrometeorological data were integrated to simulate hydrological behavior under varying land use and climate conditions—both historical and future. The results indicate a trend of decreasing streamflows across all reference indicators in the future scenario, raising concerns about the impacts of climate change on the region's water resources.

Resumo: A disponibilidade de água em uma bacia hidrográfica está diretamente relacionada às suas características geomorfológicas, climáticas e ao uso do solo. Mudanças no regime de chuvas, intensificadas pelas alterações climáticas, somadas à ocupação antrópica, têm provocado transformações significativas na dinâmica hidrológica das bacias. A Alta Bacia do Rio São Francisco é de grande relevância socioeconômica e ambiental, sendo essencial para o abastecimento e geração de energia. A modelagem hidrológica surge como ferramenta fundamental para avaliar os impactos potenciais dessas mudanças, ao simular diferentes cenários climáticos e de uso da terra. Este estudo visou modelar a bacia desde suas nascentes até a Usina Hidrelétrica de Três Marias, utilizando o Modelo Hidrológico Distribuído do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (MHD-INPE). Foram integrados dados geomorfológicos e hidrometeorológicos, possibilitando simular o comportamento hidrológico sob diferentes condições de uso do solo e clima — histórico e futuro. Os resultados apontam para uma tendência de redução nas vazões em todos os indicadores de referência no cenário futuro, o que acende um alerta para os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos da região.

Palavras-Chave – Mudanças climáticas; Modelagem; São Francisco.

1) Afiliação: Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Av. Athos da Silveira Ramos, 149. Centro de Tecnologia, 21941-909, Rio de Janeiro – RJ, felipe.dias@coc.ufrj.br.

2) Afiliação: Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Av. Athos da Silveira Ramos, 149. Centro de Tecnologia, 21941-909, Rio de Janeiro – RJ, daniel.andres@coc.ufrj.br.

1 – INTRODUÇÃO

Segundo o Sexto Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), atividades antrópicas são as principais responsáveis pelo aumento das temperaturas globais nas últimas décadas. O aquecimento médio do planeta foi de 1,1 °C, alcançando 1,6 °C sobre os continentes. Em cenários mais pessimistas, projeta-se um aumento superior a 4 °C até o fim do século, resultando em sérios impactos ambientais e sociais, como o aumento do nível do mar, alterações no ciclo hidrológico e perda de áreas férteis.

Além da mudança do clima, as atividades antrópicas promovem mudanças na paisagem das bacias, afetando sua resposta hidrológica. O uso e cobertura da terra influencia em forma direta e indireta o ciclo hidrológico e o clima local, modificando a resposta hidrológica e os caminhos do fluxo d'água numa bacia (Rodriguez e Tomasella, 2016; Pereira Filho *et al.*, 2015; Ellison *et al.*, 2017).

As mudanças no uso e cobertura do solo afetam diretamente a evapotranspiração (Bruijnzeel, 2004), o balanço de energia superficial (Pielke, 2005) e os processos hidrológicos. A disponibilidade hídrica de uma bacia depende de fatores como geologia, geomorfologia, clima e uso da terra. Alterações nos padrões de chuva e na cobertura vegetal modificam significativamente a resposta hidrológica da bacia.

A Alta Bacia do Rio São Francisco desempenha um papel essencial no abastecimento de água, na geração de energia e no suporte a diversas atividades econômicas da região. Nessa região está localizado o Reservatório de Três Marias, um dos principais reservatórios do sistema elétrico nacional. Ainda, as águas do Rio das Velhas, um dos principais afluentes ao São Francisco, abastecem o consumo da Região Metropolitana de Belo Horizonte, uma das principais metrópoles do Brasil.

As contribuições do Alto São Francisco estendem-se à bacia como um todo, influenciando diretamente atividades econômicas a jusante, como a agricultura irrigada, a pesca, e a transposição do rio. Com uma área aproximada de 640 mil km² e um curso de mais de 2.800 km, o “Velho Chico” é fundamental para a integração regional e o desenvolvimento sustentável do Brasil.

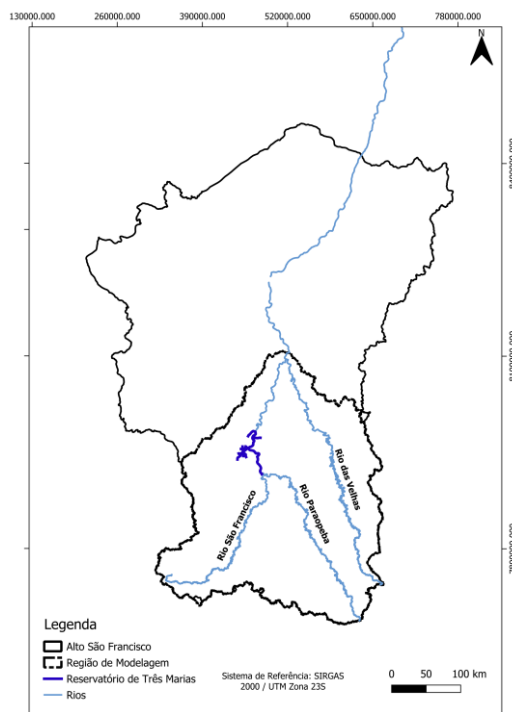
O objetivo do trabalho foi a construção e análise de projeções de disponibilidade hídrica, sob o impacto de mudanças do uso da terra e mudanças climáticas na parte alta da Bacia do Rio São Francisco, de sua cabeceira até a Hidrelétrica de Três Marias. Para isso foi utilizado o modelo determinístico e distribuído do Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais, MHD-INPE.

2 – MATERIAL E MÉTODOS

2.1 – Área de estudo

A área de estudo desse trabalho abrange a Alta Bacia do Rio São Francisco, da cabeceira da bacia até a Usina Hidrelétrica de Três Marias. Os dois principais afluentes nessa região são o Rio das Velhas e o Rio Paraopeba, que vai ao encontro do Reservatório de Três Marias, como visto na figura 1.

Figura 1 – Área de Estudo – Alto São Francisco



O reservatório de Três Marias exerce função estratégica na geração de energia, no abastecimento e na regularização das vazões do Rio São Francisco, sendo um dos poucos da bacia com capacidade de amortecer cheias (CBHSF, 2016).

A Bacia do Rio Paraopeba, cuja nascente está localizada na Serra da Canastra e que abrange 48 municípios, enfrentava, até 2011, contaminações decorrentes do lançamento de esgotos e do uso inadequado do solo (Polignano e Lemos, 2020). A mineração se destaca como a principal atividade econômica na região, com ênfase nos municípios de Cachoeira da Prata e Esmeraldas (Sabino *et al.*, 2008). Em 2019, o rompimento da barragem de rejeitos no ribeirão Ferro-Carvão provocou severos impactos ambientais ao longo do Paraopeba, alcançando a Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo.

Já a Bacia do Rio das Velhas abastece 70% da população de Belo Horizonte e 50% da Região Metropolitana. Contudo, sofre com poluição intensa por mineração, esgoto e resíduos, sendo uma das áreas mais críticas do São Francisco (CBHSF, 2004).

O Alto São Francisco, onde a área de estudo está inserida, tem uma extensão de 570 km, com sua nascente em São Roque – MG, e abrange a barragem Três Marias. Engloba a maior parte da população presente na bacia.

2.2 – Dados e modelo

Para a modelagem hidrológica foi utilizado o Modelo Hidrológico Distribuído (MHD) do Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais (INPE) – MHD-INPE (Rodriguez e Tomasella, 2016). O MHD-INPE é um modelo determinístico e distribuído, desenvolvido com base no modelo MGB-IPH (Collischonn *et al.*, 2007). O MHD-INPE é composto por diversas rotinas na linguagem de programação Fortran que realizam a leitura e o processamento dos dados de entrada.

O MHD-INPE é um modelo conceitual que representa os componentes do balanço hídrico e a geração de escoamento na bacia, através de uma combinação dos arcabouços Xinanjiang (Zhao, 1992) e TopModel (Beven e Kirby, 1979), simulando a transformação da chuva em vazão. São modelados processos como evapotranspiração, armazenamento de água no solo, variações nos meios saturados e insaturados e escoamentos horizontais, em unidades regulares chamadas células. A geração de escoamento é baseada em conceitos probabilísticos da capacidade de armazenamento, índice topográfico e profundidade do lençol freático, enquanto a vazão é simulada pela translação do escoamento nos canais.

A modelagem para o Alto São Francisco requereu variáveis meteorológicas, como séries históricas de 36 estações fluviométricas representativas das sub-bacias, além de dados diários de precipitação, temperatura, velocidade do vento e pressão atmosférica, cobrindo o período de 1980 a 2016.

O Modelo MHD-INPE utiliza mapas de uso e cobertura da terra, obtidos por classificação de imagens de satélite, para simular os processos hidrológicos em cada célula. Na modelagem da Alta Bacia do Rio São Francisco, foram utilizados 34 mapas temáticos do Projeto MapBiomás – Coleção 4 (2020), abrangendo o período de 1985 a 2018. O processamento de dados de entrada, o cálculo do balanço hídrico, a propagação de vazões e a preparação das saídas são realizados por rotinas em Fortran (Negrão *et al.*, 2016). A calibração do modelo ocorre de forma interativa, utilizando o método Shuffled Complex Evolution (Duan *et al.*, 1992), que avalia a qualidade do ajuste por meio de diferentes funções objetivo, incluindo o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) (Eq. 1).

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln Q_{Ci} - \ln Q_{Oi})^2}{\sum_{i=1}^n (\ln Q_{Oi} - \ln QO)^2} \quad (1)$$

Onde:

Q_{Ci} é a vazão calculada num intervalo de tempo i ; Q_{Oi} é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo; n é o número de intervalos de tempo e QO a média das vazões observadas no período de n intervalos de tempo.

O Coeficiente Nash-Sutcliffe é uma forma de medir o quanto o modelo é mais eficiente que a média de longo termo. O coeficiente varia de $-\infty$ a 1, sendo desejável que seu valor se aproxime de 1,0. O modelo é considerado melhor que a média dos valores das vazões observadas quando o seu resultado é positivo (Negrão *et al.*, 2016). A classificação da eficiência das simulações foi adquirida no trabalho de Moriasi *et al.* (2007), onde os valores de Nash $> 0,50$ são satisfatórios, sendo desejável que seu valor se aproxime de 1,0.

A validação do MHD-INPE na Bacia do Rio São Francisco foi realizada comparando descritores estatísticos das curvas de duração de vazões (CDV) simuladas com dados observados (SIM-OBS) e simulados pelo modelo climático (SIM-SIM), no período de 1982 a 2010. Foram calculadas as vazões de referência (Q_{95} , Q_{90} , Q_{70} , Q_{20} e Q_{05}). A validação incluiu ainda os descritores derivados da CDV: área dos máximos, área dos mínimos e inclinação, conforme Yilmaz *et al.* (2005) e Ley *et al.* (2011).

2.3 – Cenários de Mudança Climática

O estudo utilizou dados do projeto “HIGH-END CLIMATE IMPACTS AND EXTREMES” (HELIX WP3 - Wyser *et al.*, 2017; Satoh *et al.*, 2021), uma pesquisa colaborativa financiada pela União Europeia sobre os impactos globais das mudanças climáticas. O HELIX forneceu dados climáticos diários do período histórico (1981-2010) e projeções futuras (2011-2100) do modelo EC-EARTH (Haarsma *et al.*, 2020), sob o cenário RCP 8.5 do IPCC (2021), caracterizado por altas emissões e aquecimento global superior a 4°C até 2100, visando avaliar os impactos mais severos.

Foram realizados três experimentos:

a) Simulação de vazões com Dados Climáticos Observados (SIM-OBS): Vazões simuladas, para o período atual, utilizando dados climáticos observados como entrada no modelo hidrológico calibrado;

b) Simulação de vazões com Dados Climáticos Simulados (SIM-SIM): Vazões simuladas, para o período atual, utilizando dados climáticos simulados como entrada no modelo hidrológico calibrado e

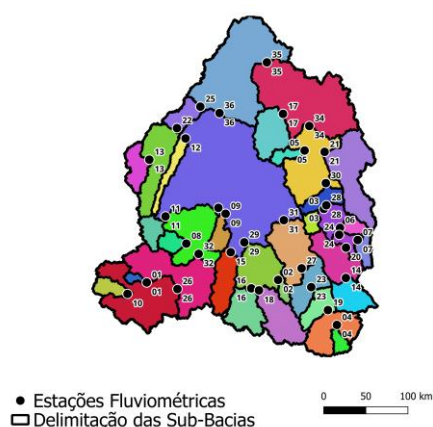
c) Projeção de vazões sob o impacto das Mudanças Climáticas (PROJ-PROJ): Vazões projetadas, para o período futuro, utilizando dados climáticos projetados como entrada no modelo hidrológico calibrado.

Uma vez calibrado o modelo, para simular as séries de vazões observadas sob as condições de clima atual, os dados das simulações climáticas históricas do projeto Helix foram utilizados para a simulação destas vazões.

3 – RESULTADOS

A partir da delimitação da área de estudo e das escolhas das estações fluviométricas, foi possível realizar a discretização da bacia de estudo (Figura 2).

Figura 2 – Sub-Bacias de parte da Alta Bacia do Rio São Francisco



Para o processo de calibração do modelo foi considerado o período de 10 anos, entre 1980 e 1990. Os valores finais dos coeficientes de eficiência foram satisfatórios para a maioria das sub-bacias, com valores mínimos de NSE = 0,340 e máximos de NSE = 0,904.

O comportamento das simulações SIM-OBS e SIM-SIM foi comparado por meio de gráficos (Figura 3) e tabela (Tabela 1). As análises indicam, em geral, subestimativas nos descritores das curvas de duração de vazões de cheia e estiagem quando usados dados climáticos simulados, com maior dispersão observada no descritor Área dos Máximos, relacionado às cheias. A inclinação média da curva de duração de vazões também foi subestimada, sugerindo uma resposta hidrológica mais regularizada, possivelmente devido a diferenças na evapotranspiração e na distribuição temporal das precipitações.

Figura 3 – Validação do Modelo

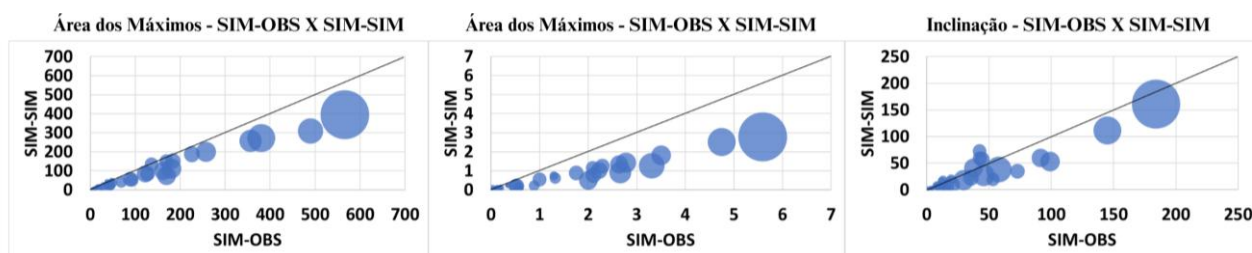


Tabela 1 – Comparação do R^2

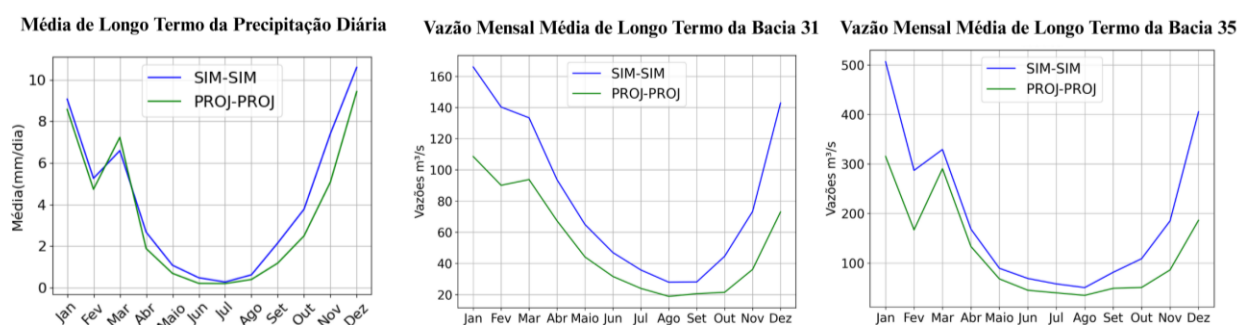
	Area dos Máximos	Área dos Mínimos	Inclinação
R^2	0.870	0.958	0.974

Apesar dessas diferenças, a avaliação do arcabouço hidrometeorológico, por meio do coeficiente de determinação (R^2), indicou bom ajuste entre as simulações com dados observados e simulados. Assim, o modelo atmosférico conseguiu representar adequadamente o comportamento estatístico hidrológico das sub-bacias.

As análises de impacto das mudanças climáticas são conduzidas comparando os resultados da simulação SIM-SIM e da projeção PROJ-PROJ, obtidas utilizando informações meteorológicas do modelo climático, obtido do projeto Helix.

A figura 4 apresenta respectivamente a média de longo termo das precipitações entre o cenário SIM-SIM e PROJ-PROJ, e as vazões médias para exutórios do Rio Paraopeba (Bacia 31) e do Rio das Velhas (Bacia 35).

Figura 4 – Resultados do SIM-SIM x PROJ-PROJ.



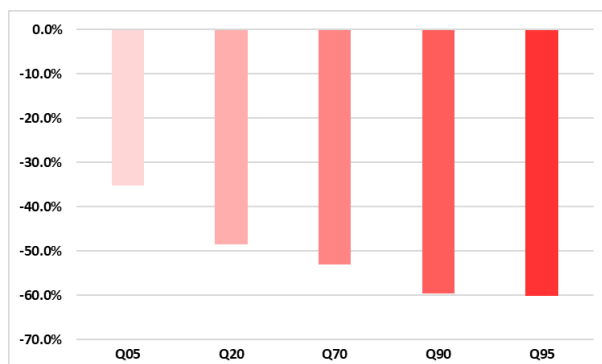
A média de longo termo das precipitações no cenário SIM-SIM apresenta uma tendência de redução em comparação ao PROJ-PROJ, apesar da manutenção do padrão sazonal, com maiores índices no verão e menores no inverno. A diminuição percentual média das precipitações ao longo do ano foi de aproximadamente 25,7%. A partir da Figura 4, observa-se que em janeiro a média de longo termo da precipitação diária passou de 9,07 mm/dia para 8,57 mm/dia, enquanto em agosto passou de 0,63 mm/dia para 0,41mm/dia.

O modelo simulou vazões mais elevadas no período SIM-SIM em comparação ao PROJ-PROJ, tendência observada de forma consistente em todas as sub-bacias. Na Bacia 31 (exutório do Rio Paraopeba), a redução percentual média foi de aproximadamente 36,4%, com variações entre 26,7% e 51,8%, evidenciando os impactos significativos das mudanças climáticas sobre o regime de vazões. Conforme apresentado na Figura 4, em janeiro, a média da vazão mensal de longo termo passou de 166,0 m³/s para 108,6 m³/s, enquanto em agosto foi registrada uma redução de 28,0 m³/s para 18,9 m³/s.

Na Bacia 35 (exutório do Rio das Velhas), também se verificou uma redução consistente nas vazões no cenário PROJ-PROJ em relação ao SIM-SIM, com uma queda percentual média de aproximadamente 36,2%, variando entre 11,8% e 54,0% ao longo do ano. Conforme apresentado na Figura 4, em janeiro, a média da vazão mensal de longo termo passou de 506,4 m³/s para 315,3m³/s, enquanto em agosto passou de 50,3 m³/s para 34,7 m³/s.

A Figura 5 representa as médias das variações das vazões de referência analisadas no estudo, considerando todas as bacias. As vazões mais elevadas (Q05) apresentam uma variação menor quando comparadas às demais vazões de referência. A maior variação é registrada para a Q95, indicando que, sob este cenário de mudanças climáticas, as vazões mínimas tenderão a ser menores e a variar de forma mais acentuada do que os valores máximos. Esse padrão sugere uma mudança substancial nas condições hidrológicas, indicando uma maior volatilidade nos eventos de baixa vazão.

Figura 5 – Média das Variações das cinco vazões de referência analisados



De forma geral, os resultados globalmente negativos em todas as vazões de referência mostram uma tendência de diminuição generalizada nas vazões, indicando um potencial impacto na disponibilidade hídrica dessas sub-bacias. Essas variações podem ter implicações sérias para a gestão da água, destacando a necessidade de estratégias adaptativas, gestão sustentável dos recursos hídricos e planejamento eficaz para lidar com as mudanças projetadas no sistema hídrico.

4 – DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Os resultados das projeções hidrológicas para a Alta Bacia do São Francisco indicam uma redução significativa na disponibilidade hídrica, sob o cenário de mudanças climáticas considerado, com impactos potenciais no abastecimento de água, nas afluições para o reservatório de Três Marias, na geração de energia elétrica e nas atividades econômicas e sociais que dependem do rio.

Esses impactos, que se propagam por toda a bacia, evidenciam a necessidade de medidas de adaptação e mitigação frente às mudanças climáticas. A tendência de redução generalizada das vazões ressalta a urgência de implementar estratégias adaptativas, promover a gestão sustentável dos recursos hídricos e planejar ações eficazes para garantir a segurança hídrica e a preservação dos ecossistemas para as futuras gerações.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro por meio da bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- BEVEN, K.J., KIRKBY, M.J. “*A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology/Un modèle à base physique de zone d’appel variable de l’hydrologie du bassin versant*”. Hydrological Sciences Journal, 24, 43-69, 1979.
- BRUIJNZEEL, L. A. “*Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?*” Agriculture, Ecosystems & Environment, Amsterdam, v. 104, p. 185–228, set. 2004.
- CBHSF, COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. *Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco*. Salvador, 2016.
- CBHSF, COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. *Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco*. Salvador, 2004.
- 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.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. “*Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models*”. Water Resources Research, Wiley Online Library, v. 28, n. 4, p. 1015–1031, abr. 1992.
- ELLISON, David *et al.* “*Trees, forests and water: Cool insights for a hot world*”. Global Environmental Change, Denver, v.43, p. 51-61, mar. 2017.
- HAARSMA, Rein *et al.* “*HighResMIP versions of EC-Earth: EC-Earth3P and EC-Earth3P-HR – description, model computational performance and basic validation*”. Geoscientific Model Development, [S.I.], v.13, p. 3507–3527, ago. 2020.

IPCC. Climate Change 2021: *The Physical Science Basis. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, ago. 2021.

LEY, R.; CASPER, M.C.; HELLEBRAND, H.; MERZ, R. “*Catchment classification by runoff behaviour with selforganizing maps (SOM)*”. Hydrology and Earth System Sciences, v. 15, n. 9, p. 2947-2962, 2011.

LORENZ, E. N. “*Deterministic Nonperiodic Flow*”. Journal of The Atmospheric Sciences, v. 20, n. 2, p. 130-141, mar 1963.

MORIASI D.; ARNOLD J.; LIEW M. W. V.; BINGENER R. “*Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*”. ASABE, v. 50, n. 3, p 885-900, 2007.

NEGRÃO, Anne Caroline *et al.* *Modelo Hidrológico Distribuído MHD-INPE: Manual de Implementação*, São José dos Campos, 2016.

PEREIRA FILHO, A. J.; CARBONE, R. E.; TUTTLE, J. D.; KARAM, H. A. “*Convective Rainfall in Amazonia and Adjacent Tropics. Atmospheric and Climate Sciences*”, [S.I.], v. 5, n. 2, p. 137-161, abr. 2015.

PIELKE R., A. “*Land use and climate change*”. Science, [S.I.], v. 310, n. 5754, p.1625–1626, dez. 2005.

POLIGNANO, M. V.; LEMOS, R. S. “*Rompimento da barragem da Vale em Brumadinho: impactos socioambientais na Bacia do Rio Paraopeba*”. Ciência e Cultura, v. 27, n.2 São Paulo, jun. 2020.

PROJETO MAPBIOMAS – *Coleção 4 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil*. Disponível em:
https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/?activeBaseMap=8&layersOpacity=70&activeModule=cov erage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage_main&activeYear=2020&mapPosition=-14.392118%2C-56.250000%2C4&timelineLimitsRange=1985%2C2020.

RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J. “*On the Ability of Large-Scale Hydrological Models to Simulate Land use and Land Cover Change Impacts in Amazonian Basins*”. Hydrological Sciences Journal, Cachoeira Paulista, v. 61 n. 10, p. 1831-1846, maio 2016.

SABINO, C. V. S.; ABREU, J. F.; LOBATO, W.; SABINO, G. S.; KNUP, E. A. “*Análise de alguns aspectos da qualidade da água da Bacia do Rio Paraopeba utilizando estatística multivariada*”. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 8, n. 2, p. 6-18 2008.

SATOH, Yusuke *et al.* “*A quantitative evaluation of the issue of drought definition: A source of disagreement in future drought assessment*”. Environmental Research Letters, [S.I.], set. 2021, v.16 n. 10.

WYSER K.; STRANDBERG G.; CAESAR, J.; GOHAR, L. *Documentation of changes in climate variability and extremes simulated by the HELIX AGCMs at the 3 SWLs and comparison to changes in equivalent SST/SIC low-resolution CMIP5 projections. Report 3.1 to the EU FP7 HELIX programme*, [S.I.], jan. 2017.

YILMAZ, A. G.; HOSSAIN, I.; PERERA, B. J. C. “*Effect of climate change and variability on extreme rainfall intensity-frequency-duration relationships: a case study of Melbourne*”. 2005. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 18, n. 10, p-4065-4076, 2014.

ZHAO, R.J., 1992. “*The Xinanjiang model applied in China*”. *Journal of Hydrology* 135, 371–381