INTENSIDADE HIDROCLIMÁTICA ASSOCIADA ÀS MUDANÇAS DO CLIMA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BANABUIÚ

Luis César Pimentel da Silva[1]; Francisco das Chagas Vasconcelos Júnior[2]; Cleiton da Silva Silveira[3]; Paulo José Gomes Ferreira [4] & Pedro Hugo Pereira da Silva[5]

Palavras-Chave – Modelagem climática; Segurança hídrica; Eventos extremos.

INTRODUÇÃO

O semiárido do Nordeste brasileiro emerge como um dos ecossistemas mais vulneráveis aos impactos da crise climática global, apresentando uma elevada fragilidade na segurança hídrica, devido à forte irregularidade espacial e temporal no regime de precipitação (MARENGO et al., 2013). Diante do cenário de mudanças climáticas globais, esse panorama se intensifica, pois, as alterações nos padrões de temperatura e precipitação afetam diretamente a sustentabilidade dos regimes hidrológicos em escala regional (SWAIN, 2025).

No contexto das mudanças climáticas, os impactos sobre o ciclo hidrológico se manifestam de forma complexa, não se restringindo apenas às alterações da precipitação média, mas também na sua intensidade e na frequência e duração de períodos secos (TAYLOR et al., 2017; IPCC, 2023).

Segundo Giorgi et al. (2011), o aquecimento global antropogênico está intrinsecamente ligado a uma mudança na estrutura das chuvas, caracterizada por um ciclo hidrológico mais intenso e acelerado. Os autores introduzem o Índice de Intensidade Hidroclimática (HY-INT), que demonstra de forma robusta que o aumento das temperaturas globais não apenas altera a intensidade das precipitações, mas também prolonga a duração dos períodos secos.

Diante desse cenário, pesquisas em escala de hidrossistemas contribuem para compreender de que maneira esses impactos se manifestam localmente. Atendendo a essa necessidade, Silva et al. (2022) avaliaram os impactos projetados nos açudes Banabuiú, Castanhão e Orós sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Os resultados indicaram um comportamento não linear nas chuvas e vazões ao longo do século, além de um aquecimento superior a 4,5 °C.

O Estado do Ceará, principalmente a região hidrográfica do rio Banabuiú, é marcada por sua elevada vulnerabilidade a eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas. Isto posto, este estudo desenvolve uma análise estatística (*Teste de Mann-Kendall*) das tendências futuras da intensidade hidroclimática, através do índice HY-INT (*Hydroclimatic Intensity*) calculado a partir de projeções futuras de precipitação (2021–2100) derivadas de modelos climáticos do CMIP6.

METODOLOGIA

A metodologia consistiu na avaliação das tendências futuras da Intensidade Hidroclimática (HY-INT) na bacia hidrográfica do rio Banabuiú, situada no Sertão Central cearense, com foco nas bacias incrementais dos cinco principais reservatórios da região, a saber: Banabuiú, Pedras Brancas, Fogareiro, Patu e Serafim Dias. Foram utilizados dados diários de precipitação projetada até o final do século (2100), provenientes de 14 modelos climáticos de circulação global do CMIP6 (ACCESS-ESM1-5, ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR, CanESM5, CMCC-ESM2, FGOALS-g3, GFDL-ESM4, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, NESM3 e NorESM2-MM), sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, selecionados pela disponibilidade de dados diários e desempenho na representação climática da América do Sul (FIRPO et al., 2022). Para

1) Universidade Estadual do Ceará - UECE, Mestrando em Climatologia pelo Centro de Ciência e Tecnologia (CCT), luiscesarps@gmail.com.
2) Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME, francisco.vasconcelos@funceme.br.
3) Universidade Federal do Ceará – UFC, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), cleitonsilveira@deha.ufc.br.
4) Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH, Gerência da Bacia do Rio Banabuiú, paulo.ferreira@cogerh.com.br.
5) Universidade Federal do Ceará – UFC, Doutorando em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), pheng.ambiental@gmail.com.

harmonizar as diferentes resoluções espaciais nativas dos modelos, que variam de $0,94° \times 0,94°$ a $2,81° \times 2,81°$, os dados foram regridizados para uma grade-alvo comum de $0,25° \times 0,25°$ utilizando o método de interpolação espacial bilinear. A partir desse remapeamento, estimou-se a precipitação diária para cada bacia incremental.

Para mitigar os erros sistêmicos das simulações dos modelos climáticos, os dados brutos de precipitação projetada passaram por correção de viés via mapeamento quantílico. Esse procedimento seguiu a proposta de Piani et al. (2010), a qual "baseia-se na premissa de que tanto as distribuições de intensidade da precipitação observada quanto as da simulada são bem aproximadas pela distribuição Gama". O ajuste das Funções de Densidade de Probabilidade (PDFs) e de Distribuição Acumulada (CDFs) dos modelos às séries históricas de cada bacia incremental foi realizado pelo método dos mínimos quadrados, identificando-se os parâmetros de forma e escala necessários para a calibração estatística.

Para avaliar as projeções futuras da intensidade hidroclimática, nas bacias incrementais dos reservatórios em estudo, foi empregado o Índice de Intensidade Hidroclimática (HY-INT), introduzido por Giorgi et al. (2011). O valor de HY-INT para um determinado ano e local é simplesmente obtido pela Equação 1:

$$HY - INT_i = \frac{INT_i}{\overline{INT}} \frac{DSL_i}{\overline{DSL}} \quad (1)$$

O cálculo do $HY - INT_i$ foi realizado em escala semestral, de janeiro a junho de cada ano, para o período de 2021 a 2100. O componente de intensidade (INT_i) foi obtido pela razão entre o acumulado de chuva do semestre e o número de dias úmidos (igual ou superior a 1 mm/dia), sendo posteriormente normalizado pela sua respectiva média climatológica ($\overline{INT}$). O componente da duração média dos períodos secos (DSL_i) foi calculado identificando-se todas as sequências de dias secos consecutivos (chuva inferior a 1 mm) entre janeiro e junho de cada ano, em seguida somam-se as durações dessas sequências e divide-se o total pelo número de períodos secos identificados no semestre, sendo o valor resultante normalizado por sua respectiva média climatológica ($\overline{DSL}$). O cálculo das métricas considerou a janela sazonal do primeiro semestre (janeiro a junho), por compreender a quadra chuvosa regional e o período hidrológico determinante para a recarga dos açudes estratégicos do Sertão Central cearense.

Por fim, o índice de Intensidade Hidroclimática ($HY - INT_i$) para um determinado ano é obtido através da multiplicação dos componentes de Intensidade da Precipitação (INT) e Duração de Períodos Secos (DSL). Esse índice tem valores positivos e é adimensional.

Para análise das tendências de longo prazo (2021-2100) dos índices hidroclimáticos, foi empregada uma metodologia de conjunto multimodelos, denominado ENS (Ensemble). Os índices foram calculados a partir dos dados de cada modelo climático e posteriormente os resultados foram agregados no conjunto ENS, atribuindo peso igual a cada um deles, a premissa é que os vieses e incertezas de cada modelo individual sejam mitigados ou cancelados parcialmente na média do conjunto (IPCC, 2023).

A identificação e validação estatística das tendências da intensidade hidroclimática e de seus componentes, foi realizada por meio do teste de Mann-Kendall, um método não paramétrico amplamente utilizado em séries temporais. Sua principal vantagem é a capacidade de identificar tendências monotônicas (crescente ou decrescente) sem a necessidade de pressupor a distribuição normal dos dados (DONG et al., 2020).

RESULTADOS

A análise das tendências de longo prazo (2021–2100) sob o cenário SSP2-4.5 evidenciou respostas divergentes entre o Índice de Intensidade Hidroclimática (HY-INT) e seus componentes (INT e DSL)

nas bacias dos açudes Banabuiú, Pedras Brancas, Fogareiro, Patu e Serafim Dias. Enquanto a Intensidade da Precipitação (INT) indicou viés de declínio, a Duração dos Períodos Secos (DSL) e o HY-INT apontaram trajetórias de elevação.

Entretanto, apenas o componente DSL registrou significância estatística ao nível de 95% de confiança, confirmando um aumento consistente na duração e na frequência dos períodos secos até o final do século XXI. Em contrapartida, as variações de INT e HY-INT permaneceram dentro da variabilidade natural, sem significância estatística. A distribuição espacial das projeções é apresentada na Figura 1, na qual as áreas hachuradas em vermelho delimitam as tendências estatisticamente significantes.

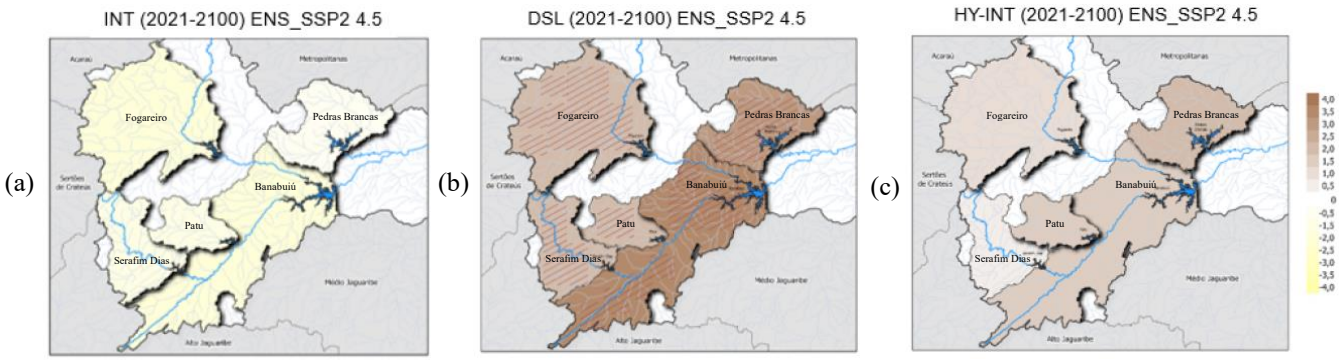


Figura 1. Distribuição espacial das tendências de longo prazo (2021-2100) dos índices hidroclimáticos: (a) INT, (b) DSL, (c) HY-INT, na escala sazonal (JFMAMJ) derivadas do ENS em resposta ao cenário SSP2-4.5.

Em contrapartida, os resultados sob o cenário SSP5-8.5 apontam para uma intensificação hidroclimática expressiva na bacia do rio Banabuiú. Diferindo do comportamento moderado do SSP2-4.5, as séries temporais de Intensidade de Precipitação (INT), Duração dos Períodos Secos (DSL) e do índice HY-INT registraram tendências quantitativas de elevação nas bacias incrementais de praticamente todos os reservatórios analisados.

Sob esse alto forçamento antropogênico, o aumento do DSL e do HY-INT apresentou significância estatística robusta ao nível de confiança de 95% em todas as cinco bacias estudadas. A intensificação das precipitações (INT) também se mostrou estatisticamente significante na quase totalidade da bacia, com exceção do açude Serafim Dias. A distribuição espacial dessas tendências é apresentada na Figura 2.

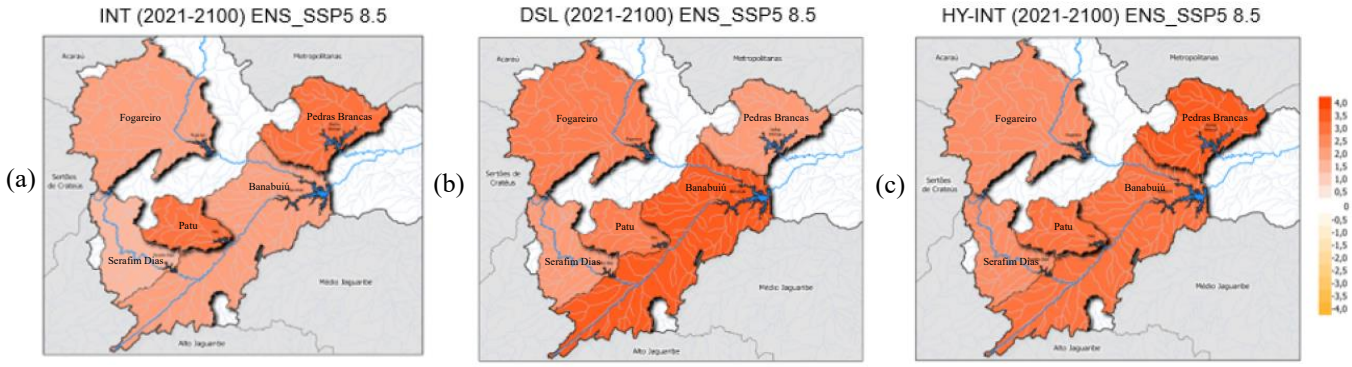


Figura 2. Distribuição espacial das tendências de longo prazo (2021-2100) dos índices hidroclimáticos: (a) INT, (b) DSL, (c) HY-INT, na escala sazonal (JFMAMJ) derivadas do ENS em resposta ao cenário SSP5-8.5.

Em suma, os resultados obtidos evidenciam uma clara reconfiguração no regime de chuvas da bacia do Banabuiú sob o cenário SSP5-8.5 (Figura 2), na qual a intensificação hidroclimática se consolida pelo avanço simultâneo de eventos intensos. A intensificação hidroclimática projetada para a bacia do rio Banabuiú sob o cenário SSP5-8.5 dialoga diretamente com os achados de Ballarin et al. (2024), que evidenciaram que as alterações no regime pluviométrico no Brasil são ditadas

predominantemente pelo aumento da frequência e duração dos períodos secos (DSL), e não apenas por variações na intensidade.

CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o comportamento da intensidade hidroclimática na bacia do rio Banabuiú sob diferentes cenários de mudanças climáticas, considerando as áreas de drenagem de seus cinco principais reservatórios. Os resultados demonstram que as alterações no regime hídrico respondem de forma proporcional ao nível de forçamento radiativo simulado, com trajetórias distintas para cada horizonte analisado.

No cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5), observou-se uma tendência consistente de ampliação na duração e na frequência dos períodos secos (DSL) até o final do século XXI, indicando estiagens mais prolongadas em todas as bacias. Já no cenário de alto forçamento (SSP5-8.5), projeta-se uma intensificação hidroclimática ainda mais severa, marcada pelo aumento simultâneo de secas extensas e episódios de precipitação extrema e concentrada.

Em síntese, os modelos apontam para uma acentuada polarização do ciclo hidrológico regional, na qual os volumes anuais de chuva tendem a ocorrer em eventos intensos intercalados por longos intervalos de estiagem. Esse panorama impõe restrições adicionais à segurança hídrica local, demandando o aprimoramento contínuo das estratégias de gestão, mitigação e adaptação climática.

REFERÊNCIAS

BALLARIN, A. S., Wendland, E., Zaerpour, M., Hatami, S., Meira Neto, A. A., & Papalexiou, S. M. (2024). Frequency rather than intensity drives projected changes of rainfall events in Brazil. Earth?s Future, 12, e2023EF004053. https://doi.org/10.1029/2023EF004053

DONG, Z.; JIA, W.; SARUKKALIGE, R.; FU, G.; MENG, Q.; WANG, Q. (2020). “Innovative Trend Analysis of Air Temperature and Precipitation in the Jinsha River Basin, China”. Water, [S.L.], v. 12, n. 11, p. 3293. MDPI AG.

FIRPO, Mári Andrea Feldman et al. Assessment of CMIP6 models performance in simulating present-day climate in Brazil. Frontiers in Climate, [S. l.], v. 4, art. 948499, p. 1-21, 2022.

GIORGI, F.; IM, E.-S.; COPPOLA, E. et al. Higher Hydroclimatic Intensity with Global Warming. Journal of Climate, v. 24, n. 20, p. 5309-5324, 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Mudança do clima 2023: relatório de síntese. Genebra, Suíça: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/. Acesso em: 19 abr. 2026.

MARENGO, J.; OBREGON, G.; RAMIREZ, V. Observed and projected changes in rainfall extremes in the Metropolitan Area of São Paulo. Climate Research, v. 57, n. 1, p. 61-72, 2013.

PIANI, C.; HAERTER, J. O.; COPPOLA, E. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. Theoretical and Applied Climatology, v. 99, n. 1-2, p. 187-192, 2010.

SILVA, Greicy Kelly da; et. al. Projeções dos impactos das mudanças climáticas sobre as bacias do hidrossistema Jaguaribe, Ceará, Brasil, utilizando informações do CORDEX do modelo climático regional RCA4. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, v. 15, n. 1, p. 258-281, 6 abr. 2022.

SWAIN, Daniel L. et al. Hydroclimate volatility on a warming Earth. Nature Reviews Earth & Environment, London, v. 6, n. 1, p. 35–50, jan. 2025.

TAYLOR, C. M. et al. Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. Nature, v. 544, n. 7651, p. 475-478, 2017.