

Impacts of climate change on the GI6 group of small inland river basins in the state of Pernambuco

Valéria Sandra de Oliveira Costa*, Lucas da Silva Teixeira**, Werônica Meira de Souza***, Josicléda Domiciano Galvinctio****

*Bolsita BFI da Facepe e Professora do PROFCIAMB Associada UFPE Recife/PE, Brasil,
e-mail: costavso@yahoo.com.br.

**Mestrando do PPCIAM/UFAPE, Garanhuns/PE, Brasil, e-mail: lucasteixeira.ufal@gmail.com

***Professora da UFAPE, Garanhuns/PE, Brasil, e-mail: veronica.meira@ufape.edu.br

****Professora do Departamento de Ciências Geográficas da UFPE, Recife/PE, Brasil,
e-mail: josicleda.galvinctio@ufpe.br

Received 18 August 2025; accepted 01 November 2025

Received 6 December 2020; accepted 20 May 2021

ABSTRACT

Given the intensification of extreme events such as prolonged droughts and intense rainfall, it is essential to understand how climate change compromises water availability and the sustainability of water resources, especially in semi-arid regions where water security, agricultural production, and social well-being are at risk. In this context, the study aimed to evaluate the hydrological response of the GI6 basin under climate change scenarios, using modeling tools capable of simulating different climatic conditions. For this purpose, the SWAT model was integrated with the SUPer system to simulate the hydrological dynamics of the GI6 basin, which was delineated using a digital elevation model and climate data that were both observed and interpolated. Two scenarios were analyzed: a reference scenario and a modified one, with a 2 °C increase in temperature and a 15% reduction in precipitation. The results indicate that the modified scenario shows a significant reduction in water availability, with decreases in total runoff, groundwater recharge, and soil moisture, along with an increase in potential evapotranspiration. These findings reveal greater water stress and lower resilience of the basin in the face of climate change. Therefore, the GI6 basin is highly vulnerable to climatic alterations, reinforcing the urgency of planning and integrated water resource management actions, supported by modeling tools to inform sustainable public policies in the context of Brazil's northeastern semi-arid region.

Keywords: water management, hydrological modeling, SUPer, SWAT, semi-arid.

Impactos das mudanças climáticas no grupo de bacias de pequenos rios interiores GI6 do estado de Pernambuco

RESUMO

Diante da intensificação de eventos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas, torna-se essencial compreender como as mudanças climáticas comprometem a disponibilidade de água e a sustentabilidade dos recursos hídricos, especialmente em regiões semiáridas, onde a segurança hídrica, a produção agrícola e o bem-estar social estão em risco. Nesse contexto, o trabalho teve por objetivo avaliar a resposta hidrológica da bacia GI6 frente a cenários de mudanças climáticas, utilizando ferramentas de modelagem que permitissem simular diferentes condições climáticas. Para tanto, utilizou-se o modelo SWAT integrado ao sistema SUPer, para simular a dinâmica hidrológica da bacia GI6, com delimitação da bacia por meio de modelo digital de elevação, com dados climáticos observados e interpolados. Foram realizados dois cenários: um de referência e outro com aumento de 2 °C na temperatura e redução de 15% na precipitação. Os resultados indicam que o cenário modificado apresenta significativa redução na disponibilidade hídrica, com diminuição do deflúvio total, da recarga subterrânea e da umidade do solo, além de aumento na evapotranspiração potencial. O que evidenciam maior estresse hídrico e menor resiliência da bacia frente às mudanças climáticas. Portanto, a bacia GI6 é altamente vulnerável às alterações climáticas, o que reforça a urgência de ações de planejamento e gestão integrada dos recursos hídricos, com apoio de ferramentas de modelagem para subsidiar políticas públicas sustentáveis no contexto do semiárido nordestino.

Palavras-Chave: gestão hídrica, modelagem hidrológica, SUPer, SWAT, semiárido.

1. Introdução

As mudanças climáticas têm provocado efeitos significativos sobre o regime hidrológico das bacias hidrográficas, particularmente em regiões semiáridas, onde a disponibilidade de água é limitada e a variabilidade climática é elevada. A intensificação de eventos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas, aliada ao aumento das temperaturas médias, pode comprometer o equilíbrio do ciclo hidrológico, afetando a recarga dos aquíferos, a geração de escoamento superficial e a retenção de umidade no solo (Marengo et al., 2016; Galvínio, 2019; Luz e Galvínio, 2022).

Diversos estudos têm demonstrado que o aumento da temperatura média global causa uma intensificação do ciclo hidrológico, o que poderá ocasionar mudanças nos regimes das chuvas, como o aumento da ocorrência de eventos hidrológicos extremos, alterando fortemente a disponibilidade hídrica de uma região e a qualidade de vida da população (Silva et al., 2017). Segundo Lacerda (2024) o semiárido pernambucano pode enfrentar elevações de temperatura entre 2 e 8 °C até o fim do século, com redução de até 10 mm/ano na precipitação em algumas áreas. Essa tendência intensifica o processo de aridificação e compromete a segurança hídrica e alimentar da população local.

Diversos estudos realizados no mundo, com especial atenção ao continente africano tem mostrado como as mudanças climáticas tem intensificado os extremos hidrológicos (Taye e Dyer, 2024; Anderson et al., 2023; Gebrechorkos et al., 2023; Funk et al., 2018), com destaque para a alternância entre secas e enchentes, fenômeno que encontra paralelos importantes em bacias semiáridas brasileiras, como as de Pernambuco. Os autores destacam a heterogeneidade espacial e temporal dos impactos, a relevância das condições antecedentes e a necessidade de ferramentas de previsão aprimoradas, pontos igualmente críticos para compreender a dinâmica hidrológica em pequenas bacias do semiárido nordestino.

Estudos globais, como o do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021), já indicam aumento de 30% na frequência de eventos de precipitação extrema, enquanto análises de Sun et al. (2021) confirmam a intensificação da precipitação em dois terços das estações avaliadas mundialmente. Para regiões vulneráveis, como o semiárido africano e o nordestino brasileiro, tais mudanças se traduzem em crises hídricas recorrentes. Além disso, Ward et al. (2020) reforçam que secas e cheias precisam ser

analisadas conjuntamente, pois fazem parte do mesmo ciclo hidrológico. Esse enfoque de “eventos compostos” também foi defendido por Zscheischler et al. (2020), ao propor uma tipologia para eventos climáticos extremos.

Na escala regional, Onyutha (2020) analisou extremos de precipitação no Leste da África usando dados de estações e simulações climáticas, mostrando padrões divergentes de tendência que dificultam a gestão. De forma semelhante, em Pernambuco, o desafio é integrar informações locais de bacias pequenas (como as GI6) com projeções climáticas de maior escala. Outro ponto destacado por Taye e Dyer (2024) é a influência dos grandes modos de variabilidade climática, como o El Niño–Oscilação Sul (ENSO) e o Índice do Oceano Índico (IOD), que modulam chuvas e secas na África Oriental. Essa discussão encontra semelhança com o papel do Atlântico Tropical e do ENSO no Nordeste brasileiro.

Para projeções futuras, Gebrechorkos et al. (2023) demonstram que a incerteza nos modelos climáticos para extremos hidrológicos ainda é elevada, reforçando a necessidade de métodos de downscaling mais robustos. Já Haile et al. (2020) projetam mudanças relevantes nos padrões de seca, alertando para sua maior frequência e intensidade. Em termos de adaptação, ferramentas como o Flood-PROOFS East Africa (World Meteorological Organization [WMO], 2023) exemplificam a integração de modelos hidrológicos e previsões meteorológicas para reduzir riscos de enchentes. No Brasil, experiências semelhantes podem ser aplicadas para as bacias GI6, sobretudo no suporte à gestão integrada de recursos hídricos, considerando o sistema SUPER-Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco.

Análises de séries históricas de precipitação realizadas por Silva et al. (2017) mostram aumento na frequência de eventos extremos, como chuvas intensas e veranicos prolongados, nas bacias hidrográficas de Mundaú, Sirinhaém e Garças em Pernambuco. Tais eventos alteram o regime hidrológico, provocando enchentes, erosão e perda de solo fértil.

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) alerta que a disponibilidade hídrica pode cair em até 40% em bacias hidrográficas do Nordeste até 2040, exigindo ações urgentes de planejamento e gestão integrada dos recursos hídricos (ANA, 2024).

A modelagem hidrológica é fundamental para compreender o comportamento das bacias hidrográficas, permitindo simular fluxos de água, impactos do uso do solo e mudanças climáticas. E ainda apoia a gestão eficiente dos recursos hídricos, orienta políticas públicas e contribui para decisões sustentáveis em contextos de escassez e vulnerabilidade ambiental. Farias et al. (2023a) reforçam a importância da modelagem hidrológica e de sistemas como o SUPER - Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco, plataforma interativa de modelagem hidrológica e de qualidade da água que utiliza o SWAT - Soil and Water Assessment Tool para simulações em bacias hidrográficas de Pernambuco, como ferramentas valiosas para análise e governança dos recursos hídricos em nível regional, capazes de auxiliar na tomada de decisões informadas e sustentáveis

Pesquisas recentes indicam que o uso de modelos hidrológicos, como o SWAT (2025) e o SUPER (2025) como uma ferramenta robusta para a análise e o planejamento da gestão hídrica no estado de Pernambuco (Freire-Silva et al., 2022; Luz e Galvêncio, 2022; Silveira et al., 2022; Farias et al., 2023a; Farias et al., 2023b; Silveira et al., 2023; Soares et al., 2023; Tibúrcio et al., 2023; Galvêncio et al., 2024a; Galvêncio et al., 2024b; Soares et al., 2024; Costa e Galvêncio, 2025).

O Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) de Pernambuco (Pernambuco, 1998) foi atualizado em 2022, reduzindo as Unidades de Planejamento (UPs) de 29 para 16 com base em critérios técnicos como hidrogeologia, geologia, uso do solo, rede de adutoras, existência de perímetros irrigados, entre outros, agregando pequenas bacias às grandes bacias adjacentes. A Unidade de Planejamento 13 (UP13) passou a incorporar o grupo de bacias de pequenos rios interiores GI6, sendo sua bacia hidrográfica principal a do rio Brígida. (APAC, 2025a; APAC e Banco Mundial, 2020).

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar os impactos das

mudanças climáticas nos recursos hídricos da bacia GI6, por meio de simulações hidrológicas realizadas com o modelo SWAT e o sistema SUPER.

2. Material e métodos

Área de estudo

O grupo de bacias de pequenos rios interiores GI6 está inserido na UP13, sendo sua bacia hidrográfica principal a do rio Brígida (APAC, 2025a; APAC e Banco Mundial, 2020). Conforme a atualização do PERH de Pernambuco, a definição de uma única UP que reúne as regiões Brígida, GI6 e GI9 baseia-se principalmente na proximidade geográfica entre elas. A área do GI9, além de ser pequena, está totalmente limitada pela bacia hidrográfica do rio Brígida e o Estado do Ceará. Parte da GI5, correspondente à área de contribuição do Riacho dos Caibros, foi inserida nesta UP para que o perímetro de irrigação Brígida, que está localizado entre o Riacho dos Caibros e o Rio Brígida, não fique dividido em duas Unidades (APAC e Banco Mundial, 2020).

A bacia hidrográfica GI6, está localizada na porção ocidental do estado de Pernambuco, com 838,24 km² (0,85%), formada pela bacia do riacho Caraíbas e seus afluentes, abrangendo parcialmente áreas dos municípios de Orocó e Santa Maria da Boa Vista (APAC, 2013, 2025b). Inserida na região do Submédio São Francisco, é uma área de expressiva relevância ambiental e estratégica para a gestão dos recursos hídricos. A bacia GI6 apresenta predominância de Neossolos e Planossolos, solos caracteristicamente rasos e com baixa capacidade de retenção de água. Apesar dessas limitações naturais, a bacia ainda preserva cerca de 88,89% de sua vegetação nativa, com apenas 11,10% de áreas antropizadas, segundo dados da Embrapa Semiárido (2007). Essa condição indica relativa integridade ecológica, mas também ressalta a sensibilidade do ecossistema frente a pressões climáticas e antrópicas. Nas Figuras 1, 2 e 3 encontram-se a localização espacial, mapa de solo e mapa de vegetação e uso da terra da bacia GI6, respectivamente.

Figura 2 - Mapa de solo do grupo de bacias de pequenos rios interiores GI6, Pernambuco. Fonte: Elaborado por Ivan Ighour, Bolsista CNPq em Recursos Hídricos. Embrapa Semiárido (2007).

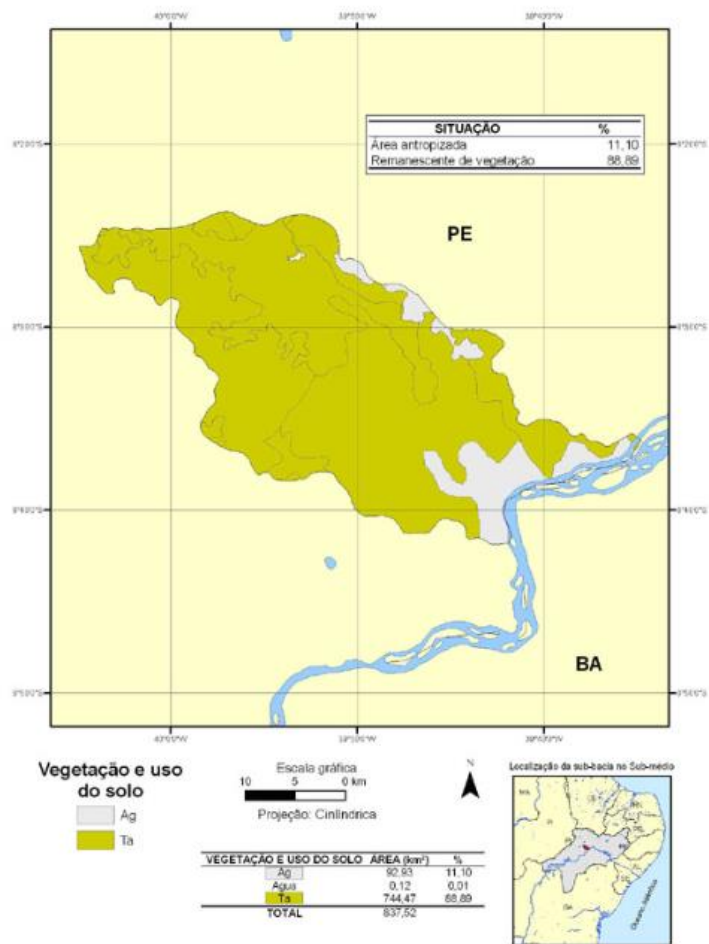


Figura 3. Mapa de vegetação e uso da terra do grupo de bacias de pequenos rios interiores GI6, Pernambuco. Fonte: Elaborado por Ivan Ighour, Bolsista CNPq em Recursos Hídricos. Embrapa Semiárido (2007).

Métodos de análises

A bacia hidrográfica GI6, situada no estado de Pernambuco, foi delimitada com base em um Modelo Digital de Elevação (MDE) hidrológicamente consistente. O modelo SWAT (SWAT, 2025) foi configurado com uso e cobertura do solo, classes de solo e rede de drenagem, definindo-se Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) por combinação de limiares de área/solo/uso.

Foram utilizadas séries observadas de precipitação e temperatura (mínima e máxima), complementadas e interpoladas via Weather Generator (WGN) do SWAT para preenchimento de lacunas e espacialização intra-bacia. Realizou-se controle de qualidade (checagem de outliers, consistência interna $T_{máx} \geq T_{mín}$, e continuidade temporal). Foram derivadas estatísticas mensais (médias, desvios-padrão e probabilidades de ocorrência de chuva) para

parametrização do WGN. O SWAT utilizou essas estatísticas para gerar/ajustar séries diárias consistentes nas sub-bacias sem estação próxima, mantendo a coerência climática regional.

Executou-se uma simulação de referência com as séries observada, incluindo Set-up/warm-up em anos inicial (dois anos) para estabilização de armazenamento em solos e aquíferos rasos. As saídas diárias foram agregadas a bases mensal e anual para análise do balanço hídrico (escoamento superficial, escoamento de base, evapotranspiração e vazão).

Para avaliar a resposta hidrológica da GI6 a mudanças climáticas, aplicou-se um cenário de sensibilidade diretamente aos arquivos meteorológicos de entrada do SWAT: Temperatura: incremento +2 °C aditivo aplicado a $T_{mín}$ e $T_{máx}$ diárias (mantendo a amplitude térmica observada). Precipitação: fator multiplicativo 0,85 (-15%) aplicado às chuvas

diárias, preservando a sequência de ocorrência de eventos.

As demais variáveis (radiação, umidade relativa, vento) foram mantidas como no baseline. Repetiu-se o spin-up e executaram-se as simulações sob o novo forçamento.

Compararam-se baseline $\times$ cenário por meio de: (i) diferenças relativas em Q_{méd}, Q₉₅/Q₅₀/Q₁₀, picos de vazão, ET, recarga e escoamento superficial/latente; (ii) análise sazonal (estação chuvosa/seca); e (iii) métricas de variação do balanço hídrico por sub-bacia. Avaliou-se a aderência do baseline a observações hidrométricas (Nash-Sutcliffe, r^2), reportando incertezas associadas ao uso do WGN. Os resultados dessas comparações e das calibrações estão publicados em Farias et al. (2023b).

O SUPer foi utilizado como software organizador e fornecedor de dados para a modelagem hidrológica, apresentando resultados de simulações para a bacia GI6. O sistema amplia significativamente a usabilidade do modelo SWAT, facilitando a simulação de cenários de mudanças climáticas e outros estudos hidrológicos em bacias hidrográficas de Pernambuco (SUPer, 2025).

3. Resultados e discussão

As respostas hidrológicas da bacia GI6 a mudanças climáticas podem ser observadas na Figura 4A, B, C, D e E que mostram curvas de duração de carga (Load/Duration Curves) para diferentes variáveis hidrológicas da bacia GI6, comparando dois cenários: GI6: cenário base (atual); GI6_MC: cenário modificado (aumento de 2 °C de temperatura e redução 15% de precipitação, como mencionado anteriormente).

O Deflúvio total (WYLD) apresenta diferença significativa entre GI6 e GI6_MC nas percentagens mais baixas (alta disponibilidade hídrica). O GI6 apresenta maiores valores de WYLD, especialmente até cerca de 5% de

excedência. Após isso, ambos convergem rapidamente para valores próximos de zero. O cenário modificado (GI6_MC) apresenta menor geração de água total, especialmente em eventos de alta vazão, indicando impacto direto da redução da precipitação e/ou aumento da evapotranspiração, devido as mudanças climáticas (Figura 4A)

A vazão subterrânea (GW_Q), contribuição do aquífero subterrâneo, para a bacia GI6 apresenta maiores contribuições de base (até ~3 mm) do que GI6_MC (máximo ~1.5 mm). A diferença permanece até cerca de 15% de excedência e depois os valores são similares (Figura 4B). A recarga subterrânea e liberação de baseflow são menores no cenário modificado, o que compromete a manutenção de vazões mínimas na área.

O escoamento superficial (SURQ) da bacia GI6 apresenta valores máximos próximos de 100 mm, enquanto GI6_MC chega a cerca de 80 mm. Diferença expressiva até cerca de 10% de excedência (Figura 4C). Redução significativa do escoamento superficial no cenário modificado, possivelmente devido à menor precipitação ou aumento na evaporação da lâmina de água antes de escoar.

A quantidade de água no solo (SW) da curva da bacia GI6 é consistentemente maior do que a GI6_MC em toda a faixa de excedência (Figura 4D). Diferenças de ~10 a 20 mm nas medianas. A umidade do solo sofre impacto claro no cenário modificado, com menor armazenamento hídrico disponível, o que afeta tanto a vegetação quanto o fluxo de base.

A evapotranspiração potencial (PET) neste caso, GI6_MC apresenta PET ligeiramente maior que GI6, especialmente nas menores percentagens de excedência, ou seja, dias mais secos e quentes. As curvas são muito próximas, mas a PET aumentada é compatível com um cenário de aquecimento (Figura 4E). O aumento da temperatura no cenário modificado eleva a demanda evaporativa, agravando o déficit hídrico.

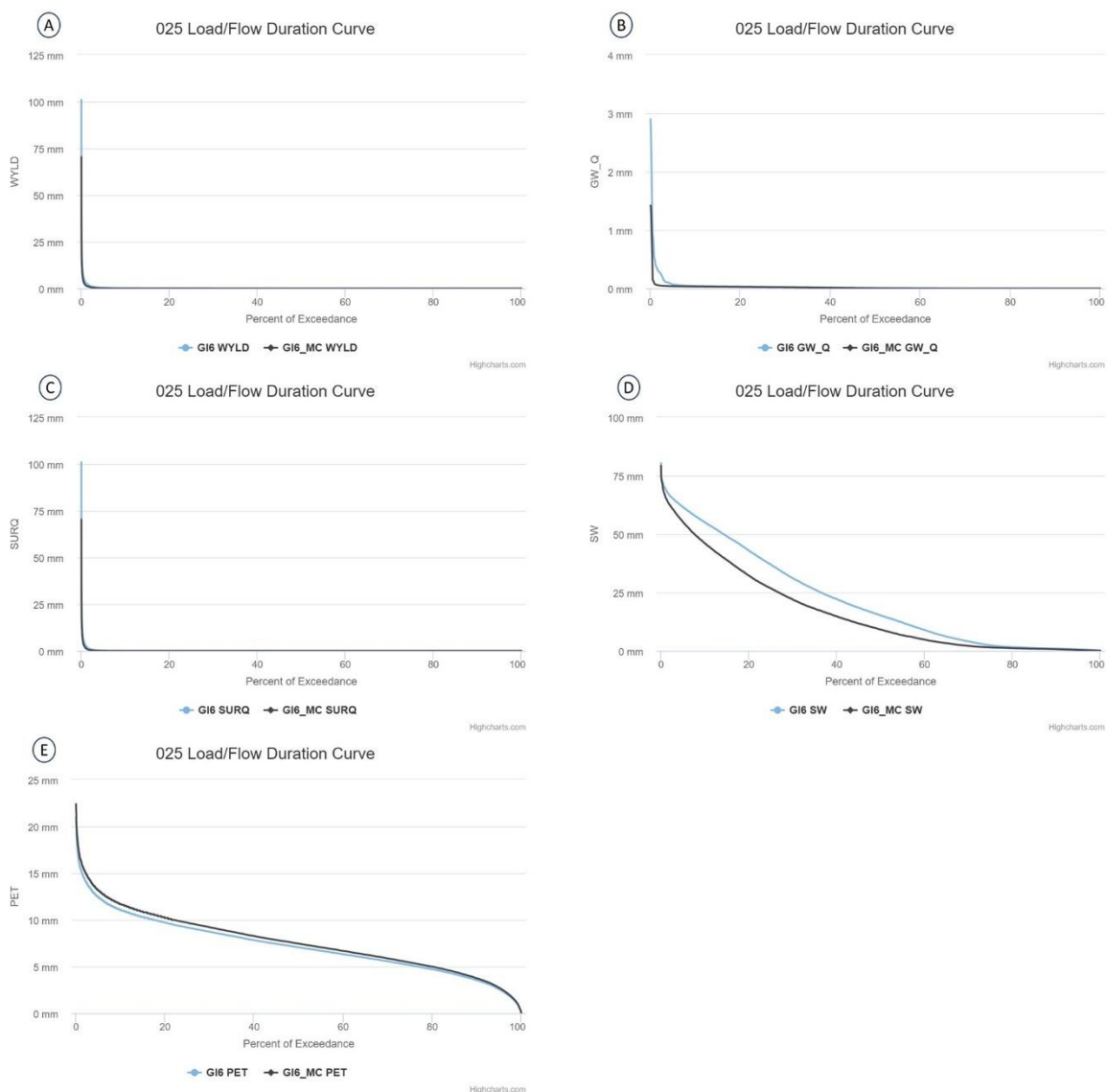


Figura 4 – Curvas de duração de carga comparando cenários atual e futuro de mudanças climáticas para o grupo de bacias de pequenos rios interiores GI6, Pernambuco. (A) Deflúvio total – WYLD; (B) Vazão subterrânea - GW_Q; (C) Escoamento superficial (SURQ); (D) Quantidade de água no solo – SW; e (E) Evapotranspiração potencial – PET. Fonte: SUPeR (2025).

O Quadro 1 apresenta uma síntese da análise dos impactos das mudanças climáticas para o grupo de bacias de pequenos rios interiores GI6 considerando o cenário de aumento de 2 °C na temperatura e redução em 15% da precipitação. E reforça as evidências apresentadas por Marengo et al. (2016) de que a partir das

mudanças climáticas os eventos extremos de secas no Nordeste podem ser potencializados, podendo acarretar na redução das chuvas e na interferência direta na diminuição das cotas e volume dos reservatórios.

Quadro 1 - Síntese da análise dos impactos das mudanças climáticas considerando o cenário de aumento de 2 °C na temperatura e redução em 15% da precipitação para o grupo de bacias de pequenos rios interiores GI6, Pernambuco.

Variáveis	Tendência GI6_MC vs. GI6	Implicações
WYLD ¹	Menor	Menor disponibilidade total de água
GW_Q ²	Menor	Redução do fluxo de base e da resiliência hídrica

SURQ ³	Menor	Menor escoamento superficial, implicando em menor recarga de açudes e rios
SW ⁴	Menor	Menor umidade do solo, impactando a vegetação e agricultura
PET ⁵	Maior	Aumento da demanda hídrica da atmosfera, intensificando a evapotranspiração

¹Deflúvio total; ²Vazão subterrânea; ³Escoamento superficial; ⁴Quantidade de água no solo; e ⁵Evapotranspiração potencial. Fonte: Elaborado pelos autores.

Segundo Tibúrcio et al. (2023) os cenários de mudanças climáticas se mostram cada vez mais severos, e se apresentam ainda mais intensos para regiões como o semiárido nordestino. Para os autores há uma necessidade do desenvolvimento de pesquisas que busquem investigar quais os efeitos que as mudanças climáticas podem causar na disponibilidade nessa região, contribuindo assim para uma gestão mais efetiva dos recursos hídricos.

Os resultados para a GI6 confirmam a alta vulnerabilidade de pequenas bacias hidrográficas do semiárido pernambucano frente ao aumento da temperatura e à redução da precipitação. Essa vulnerabilidade está em consonância com a literatura internacional que mostra um aumento de eventos hidrológicos extremos em diversas regiões do globo. O IPCC (2021) reporta que houve um aumento de 30% na frequência de eventos extremos de precipitação em escala global, fato que converge diretamente com a intensificação dos picos de cheia e estiagens observados na simulação para a GI6.

O papel das teleconexões atmosféricas na modulação dos regimes de chuva também é um ponto importante. Estudos recentes destacam que oscilações como a Madden–Julian Oscillation (MJO) afetam a variabilidade intra-sazonal das chuvas no leste da África (Ochieng et al., 2023), e fenômenos análogos podem estar associados à irregularidade pluviométrica no Nordeste do Brasil. Isso reforça a necessidade de considerar direcionamentos de larga escala na análise dos resultados obtidos para a GI6.

Outro aspecto relevante é o papel das condições antecedentes na determinação da gravidade de enchentes e secas. Woldemeskel e Sharma (2016) mostraram que a umidade do solo antes de eventos extremos pode agravar enchentes, o que é altamente pertinente para a GI6, dado o uso intensivo do solo e as práticas agrícolas que influenciam a infiltração e a recarga. Além disso, o risco de eventos compostos vem recebendo maior atenção. Zscheischler et al. (2020) classificaram os eventos compostos como aqueles em que diferentes extremos ocorrem simultaneamente ou em sequência.

A redução do fluxo de base e, ao mesmo tempo, a intensificação de picos de cheia projetados para a GI6 são um exemplo local de como secas e enchentes podem estar interligadas, criando situações críticas para a gestão.

A literatura também destaca a emergência dos flash droughts (secas de rápida evolução). Walker e Van Loon (2023) e Naumann et al. (2018) apontam que essas secas estão se tornando mais comuns em função do aquecimento global. No caso da GI6, esse tipo de evento poderia comprometer rapidamente a disponibilidade hídrica para irrigação, aumentando a insegurança alimentar local. No campo da modelagem, Brunner et al. (2021) ressaltam os desafios em prever simultaneamente cheias e secas, principalmente em regiões com poucos dados. Essa limitação é compartilhada pelo contexto do semiárido brasileiro, onde séries históricas descontínuas ainda representam um obstáculo para calibração e validação de modelos como o SWAT.

Outro ponto relevante é o aumento projetado da variabilidade do ENSO, sugerido por Cai et al. (2022), o que deve intensificar tanto eventos de El Niño quanto de La Niña. A experiência nordestina com secas severas durante El Niño forte, Galvincto e Sousa (2002) mostram que esse tipo de variabilidade pode também afetar diretamente as bacias do GI6, reforçando a importância de estudos comparativos.

A emergência de sistemas de previsão de curto prazo também merece destaque. Iniciativas como o Flood-PROOFS East Africa têm demonstrado avanços no monitoramento em tempo quase real (WMO, 2023). Transpor esse tipo de tecnologia para Pernambuco poderia ser uma solução viável para a gestão da GI6, especialmente no contexto de barragens e pequenos açudes. O SUPe pode ser esse sistema para Pernambuco.

Por fim, a literatura aponta para a necessidade de abordagens transdisciplinares que integrem dados físicos, sociais e institucionais. Richardson et al. (2022) defendem a elaboração de relatórios de risco climático regionais que combinem vulnerabilidades sociais com cenários hidrológicos. Isso mostra diretamente com a

necessidade de integrar os resultados da GI6 ao planejamento estadual de recursos hídricos. O Estado de Pernambuco já integrou essa bacia GI6 na unidade de planejamento da bacia hidrográfica do Brígida no sentido de fortalecer as decisões de políticas públicas para esta bacia hidrográfica.

4. Conclusão

O cenário GI6_MC (modificado) indica um sistema hidrológico mais estressado, com menos geração de água, menor recarga subterrânea e maior demanda evaporativa, característico de impactos climáticos como aumento de temperatura e redução da precipitação. Isso reforça a vulnerabilidade hídrica da bacia GI6 sob mudanças climáticas.

Agradecimentos

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco - FACEPE (BFI- 0094-3.07/25), a Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC pelo apoio financeiro e ao Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento - SERGEO/UFPE pelo apoio na execução da pesquisa.

Referências

- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. 2024. Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil - Sumário Executivo. ANA, Brasília.
- Anderson, W., Cook, B. I., Slinski, K., Schwarzwald, K., McNally, A., Funk, C., 2023. Multiyear La Niña events and multiseason drought in the Horn of Africa. *Journal of Hydrometeorology* 24, 119–131. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-22-0043.1>
- APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima. 2025a. Bacias Hidrográficas. <https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas>
- APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima. 2025b. Bacias Hidrográficas - GI - 6. <https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas-gi-6/180-bacias-hidrograficas-gi-6/218-gi-6>
- APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima. 2013. Relatório de Situação de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco 2011/2012. Apac, Recife.
- APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima, Banco Mundial. 2020. Atualização do Plano de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco – PERH/PE. Nota Técnica elaborada por

PROFILL e AlfaSigma. https://www.apac.pe.gov.br/images/media/1677605104_PERH_NT_UPs.pdf

- Brunner, M.I., Slater, L., Tallaksen, L.M., Clark, M., 2021. Challenges in modelling and predicting floods and droughts: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 8, e1502. <https://doi.org/10.1002/wat2.1502>
- Cai, W., Wu, L., Lengaigne, M., Li, T., McGregor, S., Kug, J.S., ... Santoso, A., 2022. Increasing frequency of extreme El Niño and La Niña events due to greenhouse warming. *Nature Reviews Earth & Environment* 3, 391-405. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00285-x>
- Costa, V.S.O., Galvêncio, J.D., 2025. Análise do grupo de bacias GI3 no contexto hidrológico de Pernambuco. *Revista Brasileira de Geografia Física* 18, 1607-1620. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.3.p1607-1620>
- Embrapa Semiárido. 2007. Balanço hídrico da bacia hidrográfica do Submédio São Francisco utilizando técnicas de sensoriamento remoto. (Equipe: Moura, M.S.B.de, Galvêncio, J.D., Sá, I.B., Sousa, F.deA.S.de, Feitosa, J.R.P., Sá, I.I.S., Ribeiro, J.G.). <http://www.cpatia.embrapa.br:8080/bhsf/index.php?opcao=g13>
- Farias, C., Miranda, R.Q., Viana, J., Lins, F., Pereira, J. A., Ursulino, B., Montenegro, S., Galvêncio, J.D., Montenegro, A., Srinivasan, R., 2023a. Calibration of SWAT model in the Pernambuco state watersheds to support the SUPER system. *Revista Brasileira de Geografia Física* 16, 3572-3592. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.6.p3572-3592>
- Farias, C.W.L.deA., Viana, J.F.deS., Miranda, R.deQ., Silva, S.F.da, Vasco, G., Montenegro, S.M.G.L., Galvêncio, J.D., 2023b. Técnica de calibração para modelagem da bacia hidrográfica do rio São Francisco, Brasil, utilizando o SWAT. *Revista Brasileira de Geografia Física* 16, 1621-1628. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.3.p1621-1628>
- Freire-Silva, J., Reis, J.V. dos, Santos, T.O. dos, Ferreira, H.dosS., Leitão, M.de M.V.B.R., Galvêncio, J.D., Candeias, A.L.B., 2022. Análise dos produtos de evapotranspiração automáticos GEE-SEBAL e do Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPER) para regiões hídricas de Serra Talhada no estado de Pernambuco. *Geografia Ensino & Pesquisa* 26, 1-20. <https://doi.org/10.5902/2236499468044>

- Funk, C., Harrison, L., Shukla, S., Pomposi, C., Galu, G., Korecha, D., Gregory Husak, G., Magadzire, T., Davenport, F., Hillbruner, C., Eilerts, G., Zaitchik, B., Verdi, J., 2018. Examining the role of unusually warm Indo-Pacific sea surface temperatures in recent African droughts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144, 360–383. <https://doi.org/10.1002/qj.3266>
- Galvêncio, J.D., 2019. Estimativa da temperatura da superfície com imagens obtidas com drones. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* 9, 397–406. 10.29150/jhrs.v9.6.p397-406
- Galvêncio, J.D., Miranda, R.Q., Luz, G.G., 2024a. Correspondência das nomenclaturas de uso do solo no Brasil e nos EUA: Uma análise na bacia do São Francisco Utilizando o modelo SWAT. *Revista Brasileira de Geografia Física* 17, 3154–3168. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.5.p3154-3168>
- Galvêncio, J.D., Miranda, R.Q., Luz, G.G., 2024b. Use of Soil Moisture as an Indicator of Climate Change in the SUPer System. *Hydrology* 11, 65. <https://doi.org/10.3390/hydrology11050065>
- Galvêncio, J.D., Sousa, F.A.S., 2002. Relação entre o fenômeno El Niño e os totais mensais precipitados na bacia hidrográfica do rio São Francisco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 7, 113–119.
- Gebrechorkos, S.H., Taye, M.T., Birhanu, B., Solomon, D., Demissie, T., 2023. Future changes in climate and hydroclimate extremes in East Africa. *Earth's Future* 11, e2022EF003011. <https://doi.org/10.1029/2022EF003011>
- Haile, G.G., Tang, Q., Hosseini-Moghari, S.M., Liu, X., Gebremicael, T.G., Leng, G., Kebede, A., Xu, X., Yun, X., 2020. Projected impacts of climate change on drought patterns over East Africa. *Earth's Future* 8, e2020EF001502. <https://doi.org/10.1029/2020EF001502>
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. 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. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Larcerda, F., 2024. Atualizações das alterações climáticas atuais e futuras: o caso de Pernambuco. Nota Técnica. IPA, Recife. [https://site.ipa.br/artigo/nota-tecnica-](https://site.ipa.br/artigo/nota-tecnica-atualizacoes-das-alteracoes-climaticas-atuais-e-futuras-o-caso-de-pernambuco/)
- atualizacoes-das-alteracoes-climaticas-atuais-e-futuras-o-caso-de-pernambuco/
- Luz, G.G., Galvêncio, J.D., 2022. Balanço hídrico superficial da bacia hidrográfica do riacho Milagres-PE, utilizando o SUPer. *Revista Brasileira de Geografia Física* 15, 1094–1107. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.2.p1094-1107>
- Marengo, J.A., Cunha, A.P., Alves, L.M., 2016. A seca de 2012–15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. *Revista Climanalise* 3, 49–54.
- Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R. A., Carrao, H., Spinoni, J., Vogt, J., Feyen, L., 2018. Global changes in drought conditions under different levels of warming. *Geophysical Research Letters* 45, 3285–3296. <https://doi.org/10.1002/2017GL076521>
- Ochieng, W.R., Awange, J.L., Forootan, E., Khandu, 2023. Madden–Julian Oscillation modulation of East African rainfall and droughts. *Climate Dynamics* 60, 879–895. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06418-9>
- Onyutha, C., 2020. Analyses of rainfall extremes in East Africa based on observations from rain gauges and climate change simulations by CORDEX RCMs. *Climate Dynamics* 54, 4841–4864. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05264-9>
- Pernambuco. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. 1998. Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH). Sectma, Recife.
- Richardson, K.J., Lewis, K.H., Krishnamurthy, P.K., Kent, C., Taylor, R.G., 2022. Climate risk reports: integrating hydrological extremes and societal vulnerability. *Climatic Change* 172, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03367-2>
- Silva, R.O.B., Montenegro, S.M.G.L., Souza, W.M.de, 2017. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. *Engenharia Sanitária e Ambiental* 22, 681–690.
- Silveira, N.T., Silveira, H.T., Tibúrcio, I.M., Galvêncio, J.D., 2022. Qualidade da Água e modelagem hidrológica: aplicabilidade do Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco (SUPer). *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto* 3, 30–40. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7510916>
- Silveira N., Tibúrcio, I., Soares, G., Galvêncio, J., Santos, D., Montenegro, S., 2023. Temporal analysis of water quality for the Nilo Coelho Reservoir, Terra Nova, Pernambuco, Brazil.

- Water 15, 2899.
<https://doi.org/10.3390/w15162899>
- Soares, G.A.S., Bandim, C.G.deA., Silveira, N.T., Barros, J.P.F.G., Silva, J.N.B.da, Galvêncio, J.D., 2024. Análise do balanço hídrico da bacia hidrográfica do Riacho Cachoeira, Serra Talhada, Pernambuco. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto* 5, 018-030.
<https://zenodo.org/records/14613167>
- Soares, G.A.S., Silveira, N.T., Bandim, C.G.deA., Barros, J.P.F.G., Vieira, G.J.daS.G., Freitas, C.J.dosS., Silva, J.N.B.da, Costa, V.S.O., Galvêncio, J.D., 2023. Climatological analysis of precipitation in the municipality of Parnamirim, Pernambuco, Brazil. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* 13, 584-594.
<https://doi.org/10.29150/jhrs.v13.4.p584-594>
- Sun, Q., Zhang, X., Zwiers, F., Westra, S., Alexander, L.V., 2021. A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation. *Journal of Climate* 34, 243–258.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0892.1>
- SUPeR - Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco. 2025. SUPeR| Sistema de Unidades de resposta hidrológica para Pernambuco. Uma ferramenta de avaliação hidrológica e de qualidade de água.
<https://super.hawqs.tamu.edu/#/>
- SWAT - Soil and Water Assessment Tool. 2025. SWAT| Soil & Water Assessment Tool.
<https://swat.tamu.edu/>
- Taye, M.T., Dyer, E., 2024. Hydrologic extremes in a changing climate: a review of extremes in East Africa. *Current Climate Change Reports* 10, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s40641-024-00193-9>
- Tibúrcio, I.M., Silveira, N.T., Santos, T.O.dos, Miranda, R.de Q., Galvêncio, J.D., 2023. Balanço hídrico e mudanças climáticas no semiárido pernambucano: aplicabilidade do Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco (SUPeR). *Revista Brasileira de Geografia Física* 16, 1657-1670.
<https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.3.p1657-1670>
- Walker, D., Van Loon, A.F., 2023. Emerging trends in flash droughts under climate change. *Nature Reviews Earth & Environment* 4, 38–52.
<https://doi.org/10.1038/s43017-022-00448-3>
- WMO - World Meteorological Organization. Flood-PROOFS East Africa. 2023. Flood preparedness and risk observation operational forecasting system. <https://public.wmo.int>
- Woldemeskel, F.M., Sharma, A., 2016. Should flood regimes change in a warming climate? The role of antecedent soil moisture conditions. *Geophysical Research Letters* 43, 7556–7563.
<https://doi.org/10.1002/2016GL069448>
- Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., Bevacqua, E., Raymond, C., Horton, R.M., van den Hurk, B., Kouchak, A., Jézéquel, A., Mahecha, M.D., Maraun, D., Ramos, A.M., Ridder, N.N., Thiery, W., Vignotto, E., 2020. A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth & Environment* 1, 333–347.
<https://doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z>