



Avaliação da influência das mudanças climáticas na dinâmica hidrológica da bacia do rio Capibaribe-PE utilizando o sistema SUPER

Gustavo Ribeiro da Silva¹ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5838-6183>

Ivan Mangini² - Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-8927-5599>

Rosmeri Porfírio da Rocha³ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3378-393X>

Josiclêda Domiciano Galvêncio⁴ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7367-6587>

Gerald Norbert Souza da Silva⁵ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9228-7608>

¹ Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil*

² Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil**

³ Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil***

⁴ Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE, Brasil****

⁵ Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa, PB, Brasil*****

Artigo recebido em 01/07/2025 e aceito em 08/10/2025

RESUMO

As mudanças climáticas representam uma ameaça significativa aos recursos hídricos, intensificando eventos extremos e alterando padrões de temperatura e precipitação, o que pode comprometer a disponibilidade de água. Este estudo analisa os impactos dessas mudanças no balanço hídrico da Bacia do Rio Capibaribe, em Pernambuco, considerando as relações entre padrões climáticos, evapotranspiração e fluxos hidrológicos. As simulações foram realizadas pelo Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPER), com base na modelagem do SWAT, usando projeções do CORDEX para 2030 a 2099 sob o cenário RCP8.5. A pesquisa incluiu análises de sensibilidade e variabilidade climática, utilizando estatísticas das projeções para alimentar o SUPER. Os resultados indicaram aumentos nas taxas de evapotranspiração potencial e real em relação ao balanço hídrico de referência, com destaque para o contexto 4, da década de 2060-2069, que apresentou um crescimento de 8,40% na evapotranspiração real. Apesar do aumento nos volumes de chuva, a evapotranspiração real também aumentou, destacando a complexidade da interação entre temperatura e precipitação. Os resultados revelam ainda uma tendência preocupante de um aumento de até 4 °C na temperatura média até o final do século, aumentando consequentemente a demanda atmosférica por água, e enfatizando a necessidade crítica de estratégias adaptativas específicas diante das mudanças climáticas.

Palavras-chave: mudanças climáticas; bacia hidrográfica; balanço hídrico; SWAT; modelagem hidrológica.

* Doutorando em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Departamento de Recursos Hídricos. E-mail: gusribeiro@dac.unicamp.br.

** Mestrando em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Departamento de Recursos Hídricos. E-mail: i237471@dac.unicamp.br.

*** Professora Doutora. Universidade de São Paulo - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Departamento de Ciências Atmosféricas. E-mail: rosmerir.rocha@iag.usp.br.

**** Professora Doutora. Universidade Federal de Pernambuco - Centro de Filosofia e Ciências Humanas - Departamento de Ciências Geográficas. E-mail: josicleda@gmail.com.

***** Professor Doutor. Universidade Federal da Paraíba – Centro de Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. E-mail: gerald.silva@academico.ufpb.br.



Assessment of the influence of climate change on the hydrological dynamics of the Capibaribe-PE river basin using the SUPER system

ABSTRACT

Climate change poses a significant threat to water resources, intensifying extreme events and altering temperature and precipitation patterns, which can compromise water availability. This study analyzes the impacts of these changes on the water balance of the Capibaribe River Basin in Pernambuco, considering the relationships between climatic patterns, evapotranspiration, and hydrological flows. Simulations were conducted using the Hydrological Response Units System for Pernambuco (SUPER), based on SWAT modeling, employing CORDEX projections for the period from 2030 to 2099 under the RCP8.5 scenario. The research included sensitivity analyses and climate variability, utilizing statistics from the projections to feed into SUPER. The results indicated increases in potential and actual evapotranspiration rates compared to the reference water balance, with a focus on context 4, corresponding to the decade of 2060-2069, which showed an increase of 8.40% in actual evapotranspiration. Despite the increase in rainfall volumes, actual evapotranspiration also rose, highlighting the complexity of the interaction between temperature and precipitation. The results also reveal a concerning trend of an increase of up to 4 °C in average temperature by the end of the century, consequently raising atmospheric water demand and emphasizing the critical need for specific adaptive strategies in response to climate change.

Keywords: climate change; watershed; water balance; SWAT; hydrological modeling.

Evaluación de la influencia de los cambios climáticos en la dinámica hidrológica de la cuenca del río Capibaribe-PE utilizando el sistema SUPER

RESUMEN

Los cambios climáticos representan una amenaza significativa para los recursos hídricos, intensificando eventos extremos y alterando los patrones de temperatura y precipitación, lo que puede comprometer la disponibilidad de agua. Este estudio analiza los impactos de estos cambios en el balance hídrico de la Cuenca del Río Capibaribe, en Pernambuco, considerando las relaciones entre patrones climáticos, evapotranspiración y flujos hidrológicos. Las simulaciones se realizaron mediante el Sistema de Unidades de Respuesta Hidrológica para Pernambuco (SUPER), basado en la modelización del SWAT, utilizando proyecciones del CORDEX para el periodo de 2030 a 2099 bajo el escenario RCP8.5. La investigación incluyó análisis de sensibilidad y variabilidad climática, utilizando estadísticas de las proyecciones para alimentar el SUPER. Los resultados indicaron aumentos en las tasas de evapotranspiración potencial y real en relación con el balance hídrico de referencia, destacando el contexto 4, correspondiente a la década de 2060-2069, que presentó un crecimiento del 8,40% en la evapotranspiración real. A pesar del aumento en los volúmenes de lluvia, la evapotranspiración real también aumentó, destacando la complejidad de la interacción entre temperatura y precipitación. Los resultados también revelan una tendencia preocupante de un aumento de hasta 4 °C en la temperatura media hasta finales del siglo, aumentando así la demanda atmosférica de agua y enfatizando la necesidad crítica de estrategias adaptativas específicas frente a los cambios climáticos.

Palabras clave: cambio climático; cuenca; balance hídrico; SWAT; modelización hidrológica.

INTRODUÇÃO

A disponibilidade hídrica é uma preocupação essencial para o desenvolvimento sustentável, impactando diretamente as necessidades básicas do meio ambiente e da população. As mudanças climáticas intensificam os desafios da gestão dos recursos hídricos, trazendo incertezas sobre a qualidade e a quantidade de água disponível. Regiões do mundo, incluindo o Nordeste Brasileiro, enfrentam eventos climáticos extremos, como chuvas intensas em períodos curtos, seguidos de longas estiagens (PBMC, 2016). Essas variações estão ligadas ao aumento da temperatura global e à atividade humana poluente, resultando em fenômenos climáticos cada vez mais severos (Bressiani *et al.*, 2015).

De acordo com o IPCC (2023), as mudanças climáticas afetam o ciclo hidrológico, alterando padrões de precipitação, evapotranspiração e escoamento, o que pode levar a uma frequência maior de eventos extremos, prejudicando a disponibilidade hídrica. O Nordeste Brasileiro é especialmente vulnerável, podendo algumas localidades se tornarem áridas, impactando a agricultura e a saúde da população, ou aumentando a ocorrência de chuvas intensas, resultando em enchentes (Marengo *et al.*, 2011).

Para compreender os impactos das mudanças climáticas na dinâmica hidrológica, é crucial utilizar modelos hidrológicos confiáveis que simulem cenários climáticos. A integração de modelos climáticos e hidrológicos permite analisar as repercussões dessas mudanças nos recursos hídricos (Faramarzi *et al.*, 2013). O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é amplamente aplicado para simular processos hidrológicos complexos e avaliar os efeitos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica (Viana *et al.*, 2018; Nangombe, Faramarzi e Beevers, 2020).

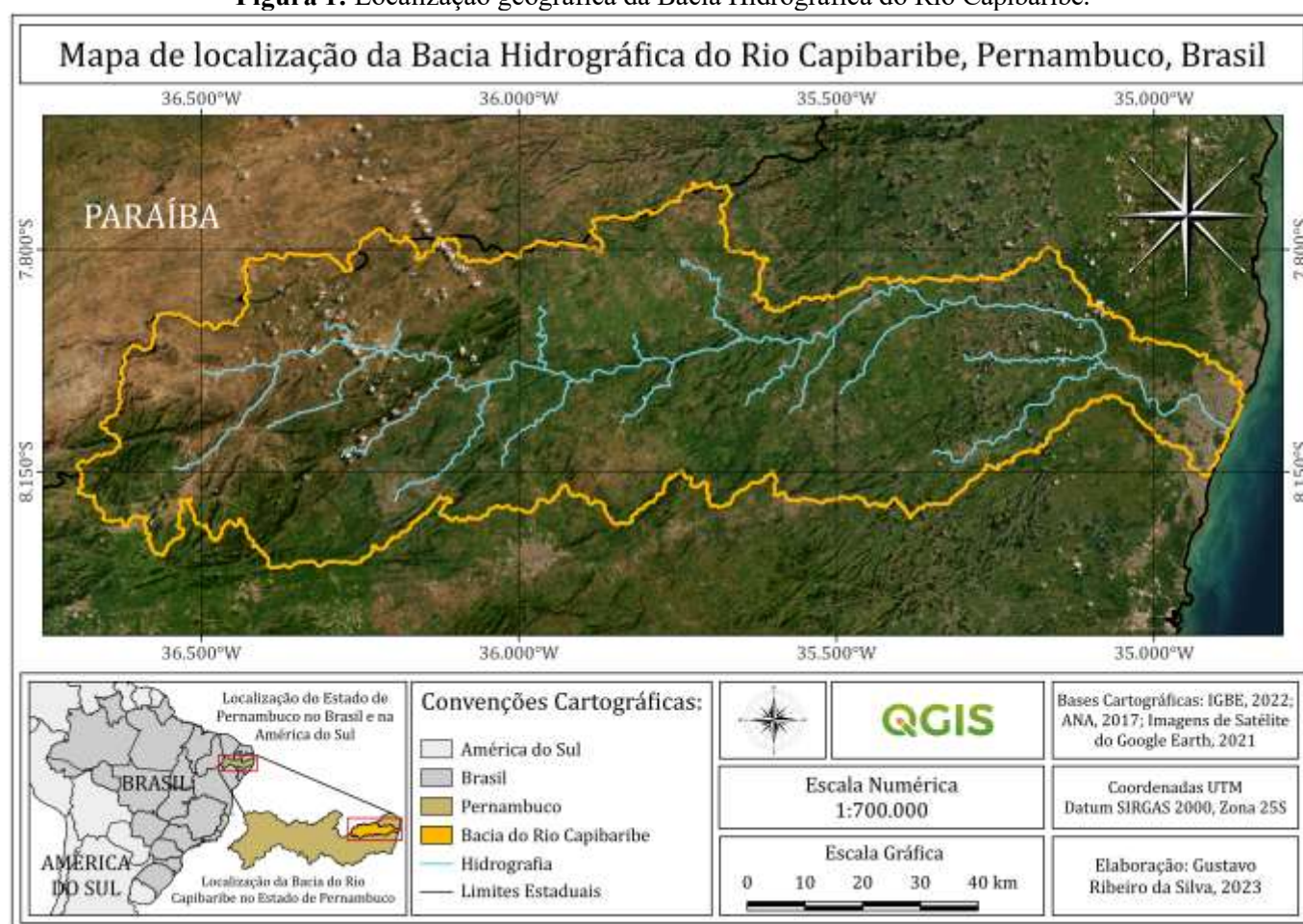
O Estado de Pernambuco enfrenta sérios problemas relacionados à escassez de água e à ocorrência de chuvas intensas, que geram enchentes e deslizamentos. O município de Recife, inserido na Bacia do Rio Capibaribe, é um exemplo de local vulnerável, classificado como a 16ª cidade mais ameaçada pelo aumento do nível do mar (IPCC, 2021). Diante disso, pesquisadores da Universidade Federal de Pernambuco e instituições parceiras desenvolveram o Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPER), que utiliza o modelo SWAT para simulações hidrológicas e de qualidade da água.

Este estudo teve como objetivo analisar os efeitos das mudanças climáticas na hidrologia da Bacia do Rio Capibaribe em Pernambuco, utilizando o SUPER e as projeções climáticas do *Coordinated Regional Downscaling Experiment* (CORDEX) para o cenário RCP8.5, entre 2030 e 2099. A aplicação da presente ferramenta permitiu avaliar como as mudanças climáticas afetarão o comportamento hidrológico da bacia, proporcionando dados para fundamentar decisões e implementar medidas que minimizem os impactos das mudanças no regime hídrico, contribuindo para a gestão sustentável frente aos desafios climáticos.

METODOLOGIA

A Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe, localizada no Estado de Pernambuco, abrange uma área de 7.454,88 km², representando cerca de 7,58% do território estadual, como mostra a Figura 1. Sua geografia inclui a transição entre o semiárido e o clima tropical úmido, influenciando a variabilidade de chuvas e temperaturas. Segundo a APAC (2022), o rio nasce na divisa entre os municípios de Jataúba e Poção, seguindo por aproximadamente 280 km até desaguar na cidade do Recife, capital do Estado. O regime fluvial é intermitente nos altos e médios cursos, tornando-se perene apenas no baixo curso.

Figura 1: Localização geográfica da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

De acordo com Zanella (2014), o clima da bacia varia entre a parte semiárida, marcada por altas temperaturas e baixa pluviosidade, e a Zona da Mata e a Região Metropolitana do Recife, que apresentam maior umidade e um regime pluviométrico mais regular. As variações climáticas nas diferentes regiões da Bacia do Rio Capibaribe tornam este ecossistema não apenas complexo, mas também vulnerável, o que demanda uma gestão cuidadosa e sustentável dos recursos hídricos. Entender essas características climáticas é essencial para a elaboração de estratégias de adaptação e mitigação dos impactos das mudanças

climáticas. Isso é crucial para garantir a resiliência e a conservação desses sistemas naturais, além de sua importância para o desenvolvimento socioambiental da região (Fedorova, Levit e Cruz, 2016).

A precipitação média anual, segundo a APAC (2022), varia entre 500 a 2000 mm, com um período chuvoso mais intenso na região metropolitana. A região em questão caracteriza-se, geralmente, por um clima tropical, conforme a classificação climática de *Köppen-Geiger*, com temperaturas médias anuais variando entre 25 °C e 28 °C. Durante os meses mais quentes, que costumam ser de novembro a fevereiro, as temperaturas podem alcançar médias diurnas entre 30 °C e 32 °C, podendo até ultrapassar esses valores. Por outro lado, nos meses mais frios, de junho a agosto, as médias diurnas ficam entre 24 °C e 28 °C (SECTMA, 2003).

A Bacia do Rio Capibaribe apresenta uma diversidade altimétrica significativa, com elevações que chegam a 1.150 m no Alto Capibaribe. Aproximadamente 70% da bacia está situada em altitudes entre 300 m e 500 m. Essa configuração topográfica influencia diretamente a disponibilidade de água e a vegetação local. Já com relação aos tipos de solos, de acordo com a EMBRAPA (2021), a bacia compreende Latossolos, Argilossolos e Planossolos, sendo os Planossolos Háplicos notáveis por sua baixa drenagem, o que pode impactar o comportamento hídrico da região. O Argissolo Vermelho-Amarelo, que se destaca pela sua coloração avermelhada devido à presença de óxidos de ferro, é frequentemente encontrado em áreas tropicais e requer um manejo cuidadoso para manter sua fertilidade. Em síntese, a Bacia do Rio Capibaribe configura-se como um ecossistema desafiador que exige uma gestão sustentável dos recursos hídricos, considerando sua variabilidade climática e a interação entre fatores naturais e antrópicos.

Aplicação do Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPER)

O estado de Pernambuco, localizado no Nordeste brasileiro, tem enfrentado uma crescente vulnerabilidade dos seus recursos hídricos devido aos efeitos das mudanças climáticas. Nesse contexto, o modelo SWAT tem sido amplamente utilizado para entender as transformações no comportamento das bacias hidrográficas locais (Andrade *et al.*, 2019; Sousa *et al.*, 2018). Para aprimorar ainda mais a aplicação desse modelo, foi desenvolvido o Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPER), que visa facilitar e expandir a utilização do SWAT para as bacias hidrográficas do estado.

O SUPER, acoplado ao HAWQS (*Hydrology and Water Quality System*), oferece uma interface dinâmica para a simulação de bacias hidrográficas pernambucanas, permitindo a modelagem de impactos no uso do solo, cenários climáticos e a qualidade da água (Farias *et al.*, 2020). O SUPER é resultado de uma parceria entre diversas instituições, incluindo UFPE, UFRPE, UFCG e a *Texas A&M University*, com financiamento do CNPq (Farias *et al.*, 2023). Um dos maiores benefícios desse sistema é a disponibilização de bacias já calibradas e validadas para o SWAT, como destacado por Farias *et al.* (2023), que calibraram oito das maiores bacias do

estado, incluindo a Bacia do Rio Capibaribe. O SUPER permite a simulação em diferentes escalas – bacia, sub-bacia ou HRU – gerando estatísticas diárias, mensais ou anuais de variáveis como precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial, além de analisar parâmetros de qualidade da água, como Nitrogênio e Fósforo.

Uma funcionalidade de destaque do SUPER é a Análise de Sensibilidade e Variabilidade Climática, que possibilita a criação de cenários hidrológicos por meio de ajustes de temperatura (em graus Celsius) e precipitação (em percentuais), conforme mostrado na pesquisa de Tibúrcio *et al.* (2023). Essa funcionalidade utiliza uma série histórica de dados da APAC, que varia entre 1961 e 2022. Nesse contexto, a temperatura no SUPER é estimada de acordo com a seguinte equação:

$$T_{hr} = T_{av} + \frac{(T_{mx} - T_{mn})}{2} \cdot \cos(0,2618 \cdot (hr - 15)) \quad (\text{Equação 1})$$

O SUPER é uma ferramenta que facilita a utilização do modelo SWAT nas bacias hidrográficas de Pernambuco, oferecendo uma interface dinâmica e intuitiva para realizar avaliações hidrológicas (Farias *et al.*, 2020). Para acessar os recursos do SUPER, o usuário deve visitar o site oficial (<https://super.hawqs.tamu.edu/#/>) e se registrar, fornecendo informações pessoais e justificativas sobre o interesse no uso da plataforma. Após a aprovação do registro pelos desenvolvedores, o usuário pode fazer login e criar um novo projeto, escolhendo a bacia hidrográfica de interesse.

Durante a criação do projeto, o usuário pode nomear o cenário e selecionar um banco de dados climáticos, optando entre a série da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) ou uma versão padrão que compila dados de diversas fontes. O usuário pode também definir o período de anos para a preparação do modelo e as saídas da modelagem (diárias, mensais ou anuais), além de escolher a versão do SWAT a ser utilizada. Após configurar o cenário, é possível personalizar as entradas do SWAT e utilizar a ferramenta de análise de sensibilidade e variabilidade climática. Essa ferramenta permite simular diferentes cenários de temperatura e precipitação, contribuindo para a análise dos impactos das mudanças climáticas na bacia hidrográfica selecionada.

Dessa forma, após a delimitação dos cenários de alterações climáticas, torna-se possível a obtenção de diversos tipos de dados de saída. Entre as variáveis analisadas, destacam-se os componentes do balanço hídrico, mapas e gráficos de precipitação, evapotranspiração real e potencial, fluxo de base, armazenamento de água no solo, entre outros. Além disso, é possível extrair parâmetros relevantes para a avaliação da qualidade hídrica da bacia, contribuindo para uma compreensão mais abrangente dos efeitos climáticos sobre os recursos hídricos.

No âmbito do SUPER, a Bacia do Rio Capibaribe — foco desta pesquisa — foi dividida em 53 sub-bacias e 253 Unidades de Resposta Hidrológica (URH). Para a análise, foi selecionada a sub-bacia 42,

destacada em verde na Figura 12, por se localizar na porção mais a jusante da bacia e refletir de forma representativa seu comportamento hidrológico. Optou-se pelo banco de dados “Padrão”, em razão de seu maior horizonte temporal, garantindo uma base mais abrangente. Dois anos da série histórica foram destinados ao aquecimento do modelo, cujas saídas foram configuradas em formato diário para captar as variações hidrológicas com maior precisão. A modelagem foi realizada utilizando a versão 2012 rev. 664 do modelo SWAT.

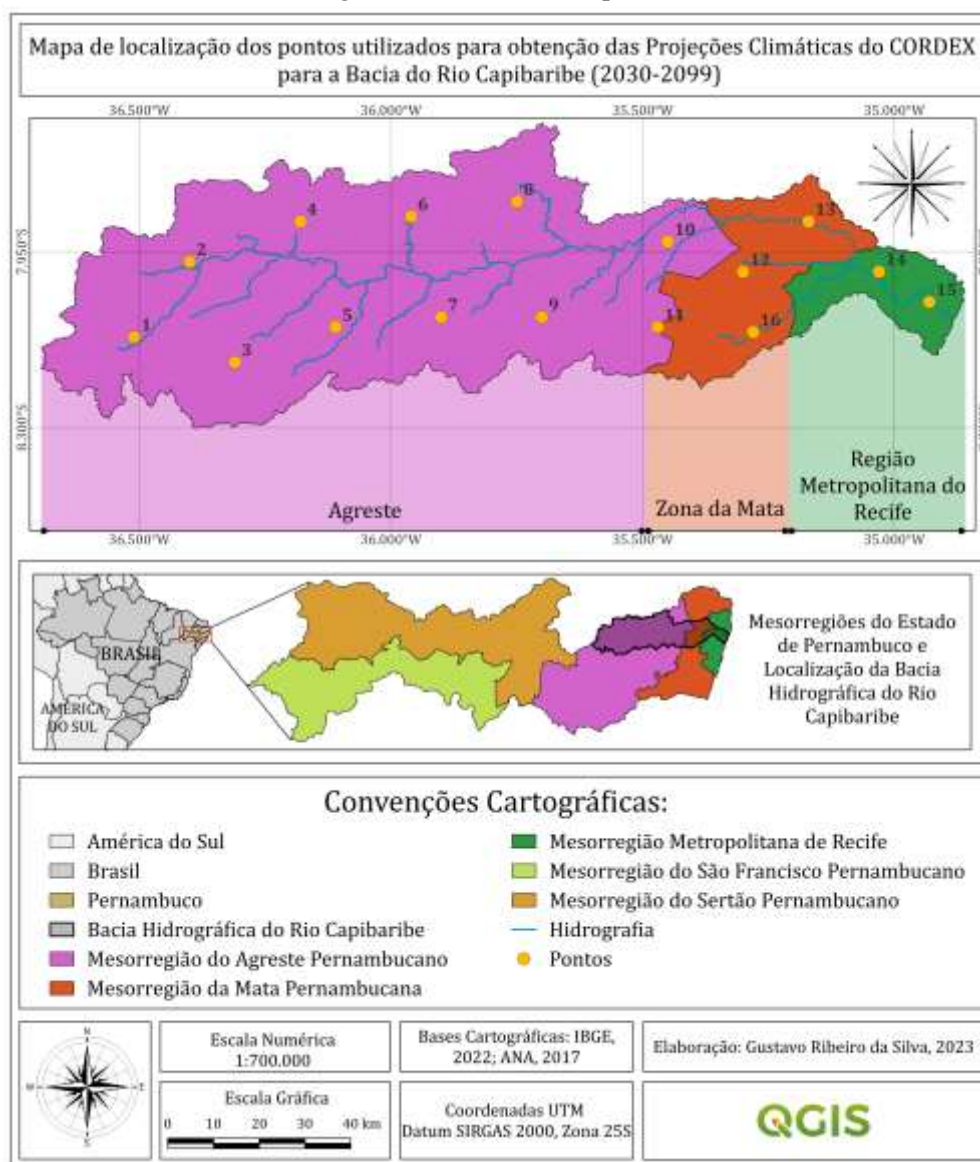
A partir da definição das configurações iniciais, foi elaborado um conjunto de cenários, segmentando a série histórica em intervalos de 10 anos e aplicando variações nos dados de precipitação e temperatura, conforme projeções do CORDEX. Esses cenários foram posteriormente inseridos na ferramenta de análise de sensibilidade e variabilidade climática.

Projeções Climáticas do CORDEX e Análise de Oscilações Climáticas na Bacia do Rio Capibaribe

Para avaliar os impactos das mudanças climáticas na hidrologia da Bacia do Rio Capibaribe, este estudo incorporou projeções climáticas regionais oriundas do programa internacional CORDEX vinculado à OMM, que visa refinar a compreensão dos impactos climáticos em escala regional (Sørland *et al.*, 2021). As projeções adotadas foram obtidas por meio do modelo RegCM4-SAM-22, acoplado ao modelo global MPI-ESM-MR (resolução média), com foco na América do Sul e alta resolução espacial.

Para a aquisição, foram selecionados 16 pontos de extração de dados climáticos distribuídos ao longo da bacia, com base na localização de estações meteorológicas e pluviométricas existentes (Figura 2). O horizonte temporal utilizado abrange o período de 2030 a 2099, sob o cenário RCP 8.5, considerado o mais crítico em termos de emissões.

Figura 2: Localização dos pontos utilizados para a obtenção das projeções climáticas do CORDEX ao longo da Bacia do Rio Capibaribe.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

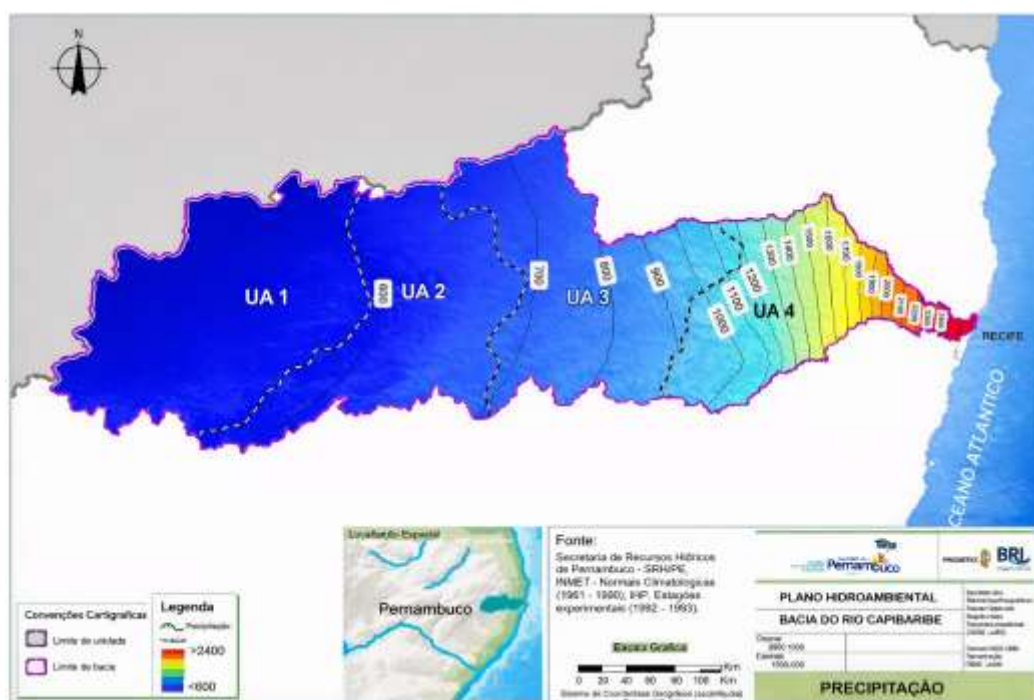
Foram obtidas projeções de precipitação, temperatura, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, sendo as duas primeiras aplicadas na ferramenta de sensibilidade e variabilidade climática do SUPer. Para investigar o impacto das mudanças climáticas, foram elaborados sete cenários decenais (Tabela 1), combinando perturbações de temperatura e precipitação sobre a climatologia de base da bacia. O balanço hídrico simulado previamente indicou uma média anual de 750,30 mm — valor típico de regiões de Caatinga no interior — crescendo gradualmente em direção ao litoral, em consonância com Pinheiro (2023). Consequentemente, as oscilações climáticas introduzidas no SUPer tomaram como referência 750,30 mm de precipitação e 24,04 °C de temperatura média anual.

Tabela 1: Conjuntos de temperatura e precipitação para realização das simulações.

Ambiente temporal	Temperatura média anual (°C)	Precipitação média anual (mm)	Período	Variação de temperatura (°C)	Variação na precipitação (%)
1	24,04	750,30	2030-2039	0,77	13,09
2			2040-2049	1,29	16,09
3			2050-2059	1,75	15,61
4			2060-2069	2,12	19,41
5			2070-2079	2,71	16,62
6			2080-2089	3,23	8,30
7			2090-2099	3,85	9,45

Nas porções litorâneas da bacia do Capibaribe, representadas pelas estações de Recife e Ipojuca, a precipitação média anual atinge 2267 mm. Esse índice, entretanto, reflete apenas o setor extremo-leste, onde a influência direta dos ventos alísios intensifica as chuvas. Quando se avança para o interior da UA4 — que abrange a Região Metropolitana do Recife e a Mata Pernambucana — a pluviosidade cai para aproximadamente 1700 mm, segundo o mapa de isoietas do Plano Hidroambiental de Pernambuco (2010, Figura 3). O contraste evidencia a marcada variabilidade espacial do regime de chuvas, controlada por gradientes orográficos e padrões de circulação atmosférica regionais.

Figura 3: Isoietas anuais médias da Bacia do Rio Capibaribe.

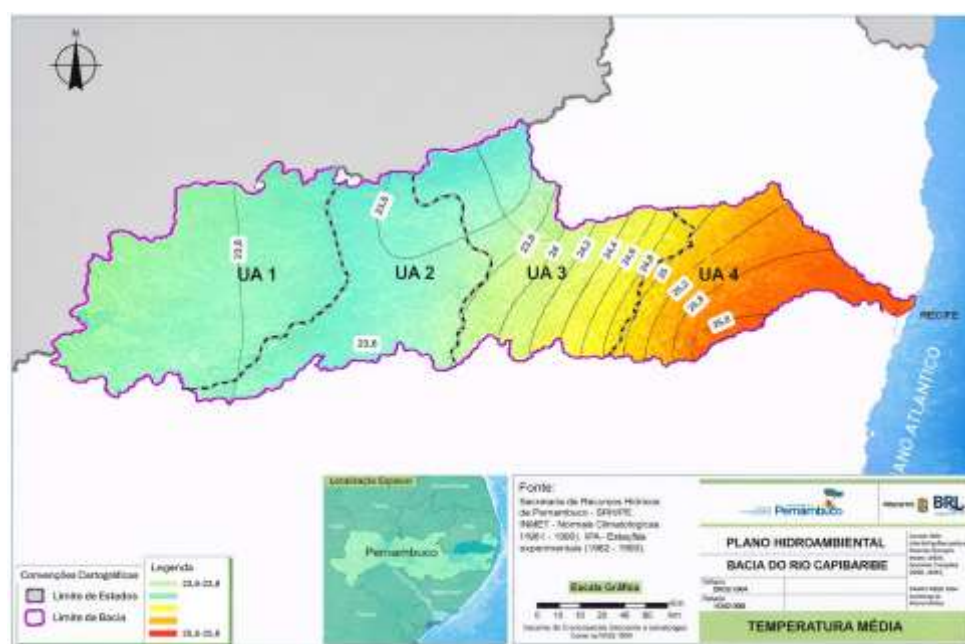


Fonte: Pernambuco (2010).

O comportamento térmico apresenta um gradiente quase oposto, como mostra a Figura 4. As isotermas médias revelam os menores valores na UA2, onde a altitude do Agreste contribui para

resfriamento relativo; nas UAs 1 e 3 os valores sobem ligeiramente, e atingem seu máximo na UA4, já sob influência marítima. As temperaturas médias anuais nas UAs 1–3 situam-se em torno de 24,15 °C, enquanto na UA4 alcançam ~25,05 °C. Para toda a bacia, o Plano Hidroambiental registra média de 24,04 °C, intervalando-se de 20,46 °C a 26,14 °C conforme dados da CPRH (2019) e de Ursulino *et al.* (2023). A progressão montante-jusante é nítida também nas temperaturas extremas: mínimas entre 16,9 °C e 23,27 °C e máximas de 25,05 °C a 29,92 °C, com abril–setembro mais frios e outubro–março mais quentes.

Figura 4: Isotermas anuais médias da Bacia do Rio Capibaribe.



Fonte: Pernambuco (2010).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

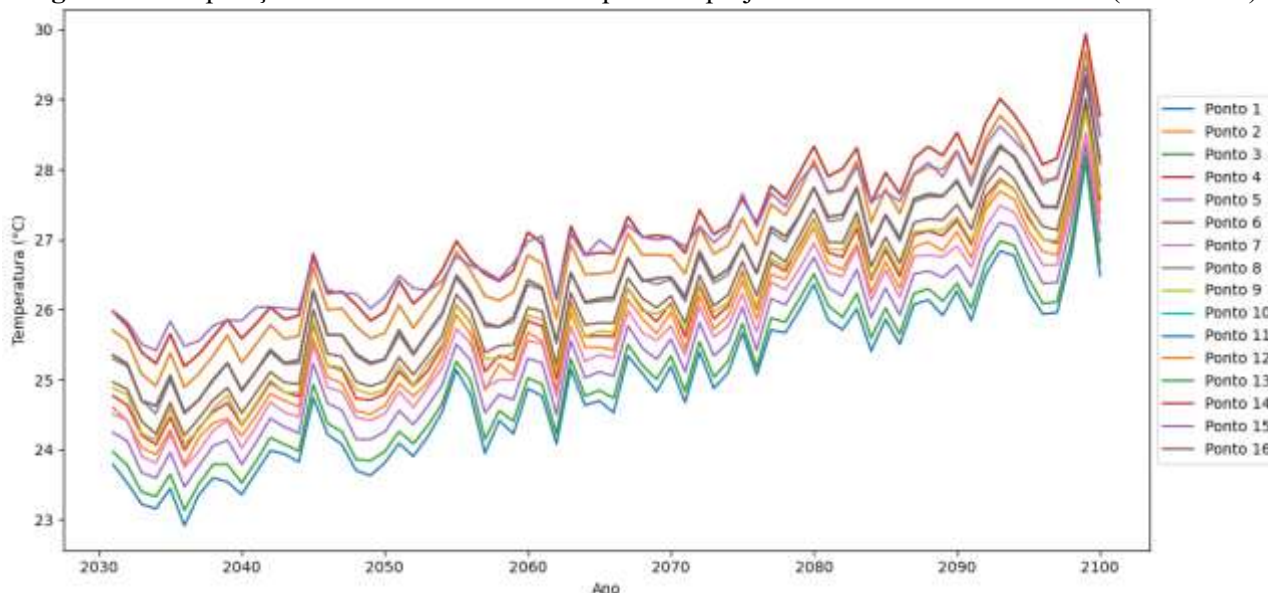
Projeções climáticas do CORDEX

Para tornar as projeções climáticas do CORDEX mais intuitivas, elaboraram-se gráficos com as variáveis regionalizadas que alimentaram a modelagem hidroclimatológica da bacia do Capibaribe. Esse passo permitiu visualizar as oscilações de temperatura e precipitação — insumos essenciais para os testes de sensibilidade e, por fim, para os cenários hidrológicos. A Figura 5 apresenta as médias anuais de temperatura dos pontos analisados para o período 2030-2099 sob o cenário RCP 8.5.

Observa-se uma tendência clara de aquecimento ao longo das décadas, coerente com o agravamento projetado das mudanças climáticas. Os pontos 11 a 16 — localizados na Zona da Mata e na RMR — registram as maiores temperaturas; em alguns casos (por exemplo, ponto 14) a média anual aproxima-se de 30 °C, sugerindo a ocorrência de máximas extremas. Essa elevação acentua a vulnerabilidade da região a

eventos extremos, como ondas de calor, secas severas e precipitações intensas, com implicações diretas para a saúde pública, a disponibilidade hídrica e os ecossistemas locais.

Figura 5: Comparação das médias anuais de temperatura projetadas e obtidas do CORDEX (2030-2099).



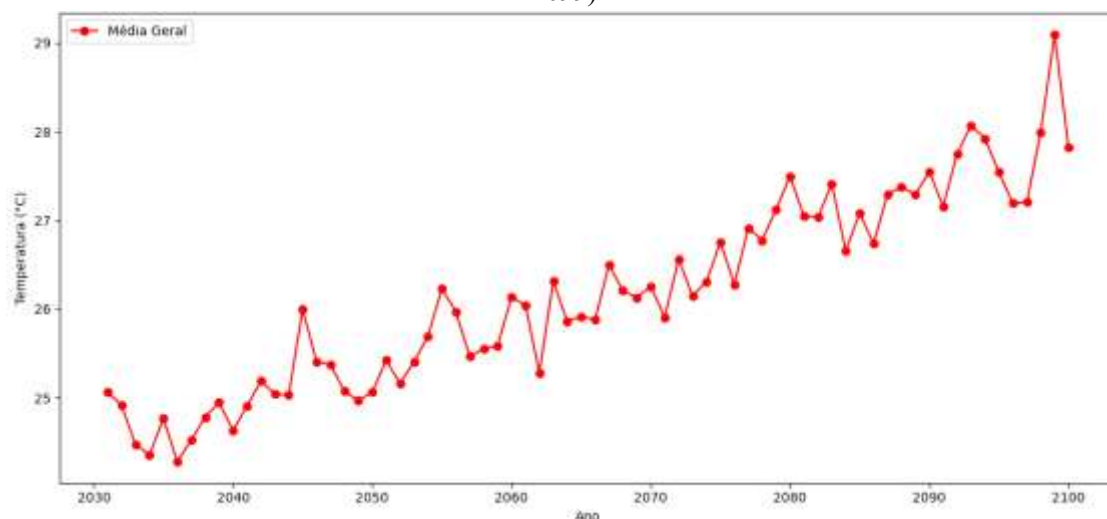
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A Figura 6 exibe a trajetória projetada da temperatura média na bacia para os próximos 70 anos. Tomando como referência o intervalo atual de 20,46 °C a 26,14 °C descrito pela CPRH (2019), constata-se que, a partir de 2045, as simulações CORDEX já ultrapassam o limite superior desse patamar. Embora ocorram oscilações interanuais — com alguns anos pontuais apresentando médias mais amenas — o padrão geral aponta um aquecimento persistente. Esse avanço gradativo eleva a probabilidade de anos excepcionalmente quentes; em 2098, por exemplo, a temperatura média anual pode se aproximar dos 30 °C, indicando um cenário de calor extremo com potenciais impactos sobre recursos hídricos, saúde pública e ecossistemas locais.

O aquecimento gradual projetado não se limita a elevar termômetros; ele repercute em toda a dinâmica socioambiental da bacia. O aumento das temperaturas médias potencializa a evapotranspiração, reduz a disponibilidade hídrica no período seco e amplia a demanda por irrigação, pressionando mananciais já vulneráveis. Eventos de calor extremo intensificam o risco de doenças relacionadas ao estresse térmico, impactam a produtividade agrícola — especialmente culturas sensíveis como o milho e a cana-de-açúcar — e elevam o consumo de energia elétrica para refrigeração. Além disso, o aquecimento acelera processos de degradação de corpos d'água, favorecendo floração de algas e comprometendo a qualidade da água. Diante desse panorama, torna-se imprescindível adotar estratégias de adaptação que combinem ações estruturais e de gestão: modernizar sistemas de irrigação, otimizar a operação de reservatórios, ampliar a cobertura vegetal ripária, implementar alertas de ondas de calor, integrar planejamento urbano-climático e fortalecer a governança hídrica. Somente medidas proativas — articuladas entre governos, setor produtivo e sociedade civil — poderão mitigar os impactos

previstos e assegurar a resiliência regional frente às mudanças climáticas.

Figura 6: Média anual de temperatura para a Bacia do Rio Capibaribe obtidas por meio de projeções do CORDEX (2030-2099).

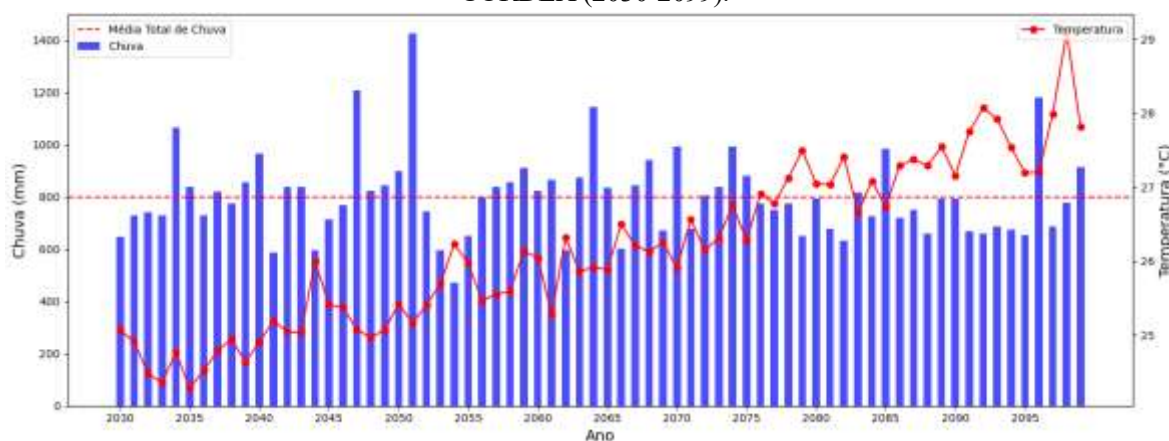


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A Figura 7 oferece um panorama detalhado da distribuição dos totais pluviométricos anuais projetados para a bacia ao longo dos próximos 70 anos. As simulações indicam que a precipitação média tenderá a estabilizar-se em torno de 800 mm/ano, valor aproximadamente 30 % inferior à média histórica de 1133,6 mm reportada pela Secretaria de Recursos Hídricos de Pernambuco (2010). Essa redução consistente reforça a perspectiva de um regime hídrico cada vez mais restritivo, sobretudo nas porções de clima semiárido do alto curso.

Ao examinar mais atentamente a série temporal, observa-se um padrão inverso entre temperatura e precipitação. Anos em que a temperatura média cai apresentam picos de pluviosidade significativamente mais altos, enquanto anos mais quentes tendem a exibir totais de chuva reduzidos. Essa correlação inversa torna-se particularmente evidente nos cenários de aquecimento projetados sob RCP 8.5, nos quais mesmo pequenas elevações térmicas correspondem a retrações sensíveis nos volumes anuais de precipitação.

Figura 7: Média anual de temperatura e acumulados de chuva na Bacia do Rio Capibaribe por meio de projeções do CORDEX (2030-2099).



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Do ponto de vista físico, essa relação está ligada à capacidade termodinâmica do ar de reter vapor d'água. Em temperaturas mais elevadas, o ar mantém maior conteúdo de umidade sem atingir o ponto de saturação, o que dificulta a formação de nuvens convectivas profundas e, por consequência, a ocorrência de chuvas intensas. Quando as temperaturas descem, o ar satura-se com maior facilidade, favorecendo a condensação do vapor, a coalescência de gotículas e, por fim, a precipitação. Além disso, o aquecimento tende a ampliar o déficit de pressão de vapor na superfície, intensificando a evapotranspiração e reduzindo o escoamento efetivo, o que agrava ainda mais a escassez hídrica em cenários de altas temperaturas.

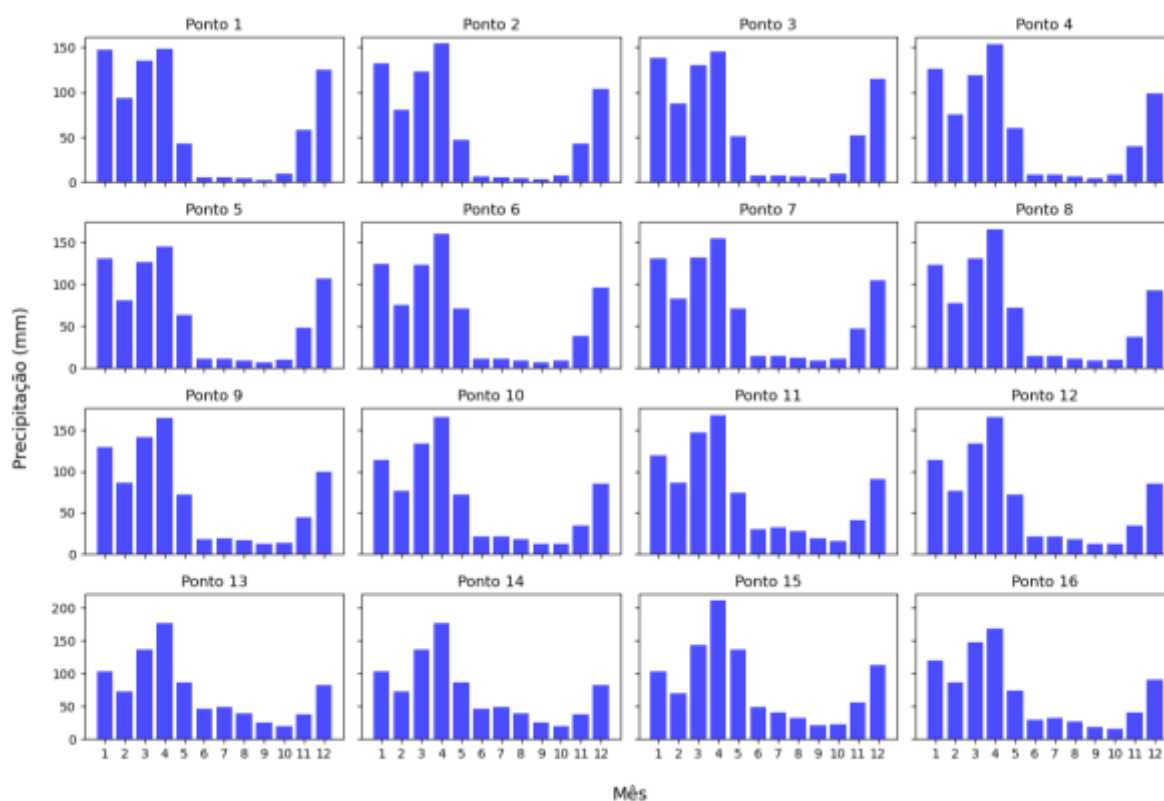
Em síntese, a projeção de um clima mais quente e mais seco não apenas diminui os volumes pluviométricos médios, mas também altera a variabilidade interanual, aumentando a frequência de anos simultaneamente quentes e secos. Esse contexto impõe desafios adicionais ao planejamento dos recursos hídricos e à gestão integrada da bacia, exigindo estratégias de adaptação que considerem a dualidade entre temperaturas ascendentes e precipitação em declínio.

A Figura 8 consolida as projeções CORDEX dos totais mensais de precipitação para os 16 pontos de referência distribuídos pelas três mesorregiões da bacia do Capibaribe. O ciclo sazonal simulado diverge sensivelmente do regime atual. Entre janeiro e abril, os modelos sugerem um acentuado incremento das chuvas, seguido por queda abrupta em maio. De junho a outubro instala-se um período seco prolongado, que concentra os menores índices pluviométricos do ano. A partir de novembro, as precipitações voltam a ganhar força e alcançam novo ápice em dezembro. Em termos práticos, o “miolo” seco estende-se por quase cinco meses, comprimindo o período úmido no início e no fim do ano hidrológico.

Esse padrão contrasta com a climatologia observada. No Agreste, o máximo pluviométrico ocorre hoje em junho e o período chuvoso dura cerca de quatro meses; na Região Metropolitana do Recife (RMR), de clima tropical úmido, o semestre chuvoso estende-se tradicionalmente de março a agosto (Pernambuco, 1994). As projeções apontam, porém, para uma reconfiguração da estacionalidade: o pico do Agreste desloca-se para o fim

do verão—início do outono, enquanto no litoral o “miolo” seco torna-se mais pronunciado, encurtando a duração efetiva da estação chuvosa.

Figura 8: Médias dos acumulados mensais de chuva na Bacia do Rio Capibaribe obtidos por meio de projeções do CORDEX (2030-2099).

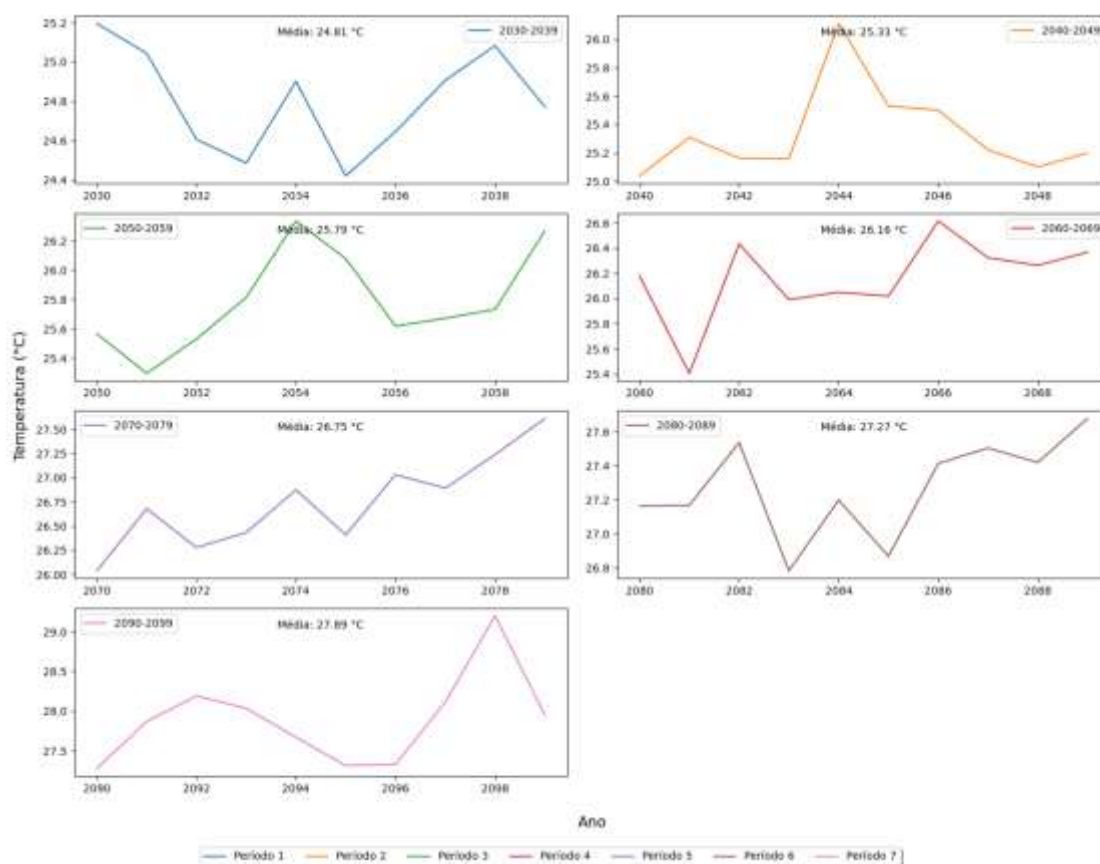


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Essa inversão de fase entre o alto e o baixo curso resalta a complexidade hidrológica da bacia e sugere riscos de descompasso entre oferta hídrica e demanda em diferentes sub-regiões. A diminuição do período chuvoso, somada à intensificação do verão seco, poderá afetar recarga aquífera, disponibilidade para irrigação e a operação de reservatórios, exigindo estratégias de gestão que considerem tais dissonâncias espaciais e temporais em cenários de mudanças climáticas.

Para configurar os cenários na ferramenta de análise de sensibilidade e variabilidade climática do SUPeR, calcularam-se, para cada um dos 16 pontos amostrados ao longo da bacia, as médias anuais de precipitação acumulada e de temperatura média. Em seguida, a série temporal foi segmentada em janelas decenais, originando sete intervalos sucessivos, conforme ilustrado nas Figuras 9 e 10.

Figura 9: Médias anuais de temperatura na Bacia do Rio Capibaribe, obtidas por meio de projeções do CORDEX e divididas em intervalos decenais.

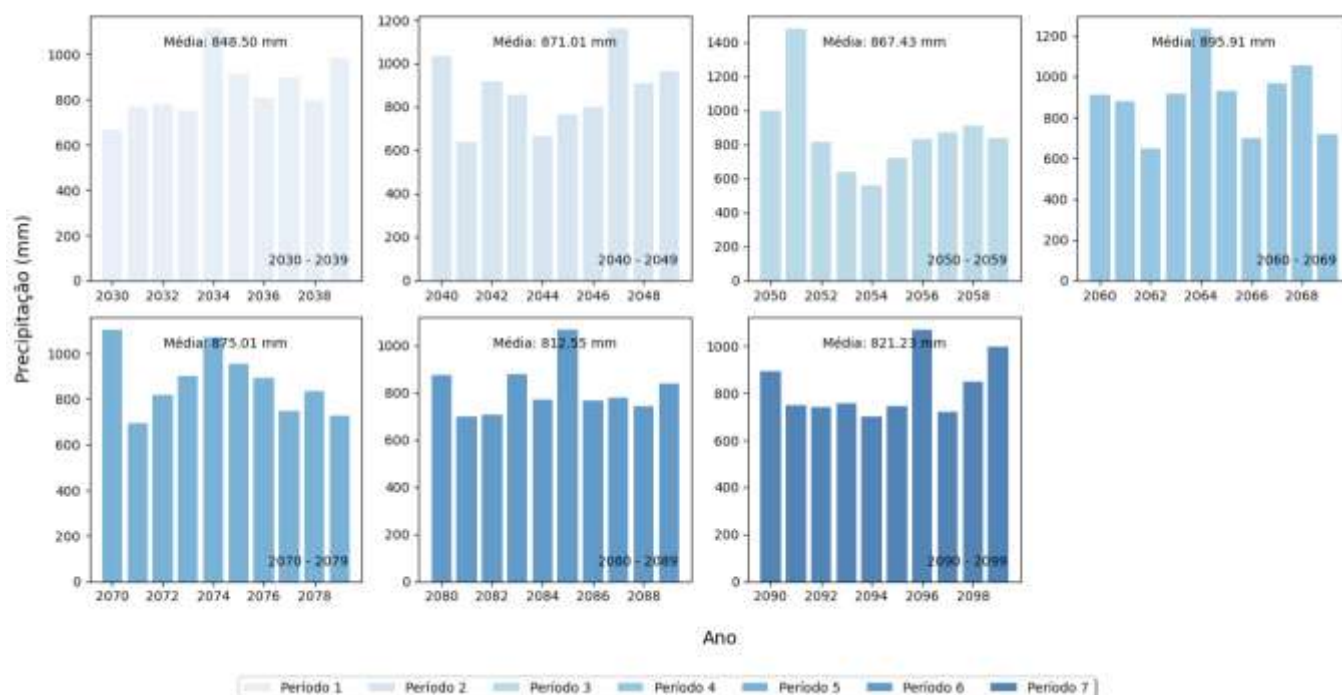


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A trajetória térmica revela um claro gradiente ascendente: a média passa de 24,81 °C no primeiro decênio (2030-2039) para 27,89 °C no último (2090-2099). Alguns anos extrapolam de forma marcante esse patamar — em 2098, por exemplo, a temperatura média projetada aproxima-se de 29 °C. Esses números confirmam a tendência de aquecimento continuado ao longo das décadas analisadas, apontando para condições climáticas cada vez mais quentes na bacia.

A Figura 10 evidencia que os totais anuais de precipitação na bacia do Capibaribe não exibem uma trajetória monotônica de aumento ou declínio; em vez disso, alternam-se ao longo do tempo. Entre 2080 e 2089 projeta-se o menor valor médio — 812,55 mm —, ao passo que o maior período chuvoso deve ocorrer entre 2060 e 2069, com média de 895,91 mm. A análise ano a ano reforça essa variabilidade: 2054 desponta como o mais seco dos próximos 70 anos, com apenas ≈ 510 mm de precipitação, sinalizando um ápice de escassez hídrica. Compreender essa oscilação de regimes pluviométricos é fundamental para o planejamento de recursos hídricos, pois exige estratégias de adaptação flexíveis capazes de responder tanto a anos de déficit quanto a períodos relativamente mais úmidos.

Figura 10: Acumulados anuais de chuva na Bacia do Rio Capibaribe, obtidos por meio de projeções do CORDEX e divididas em intervalos decenais.



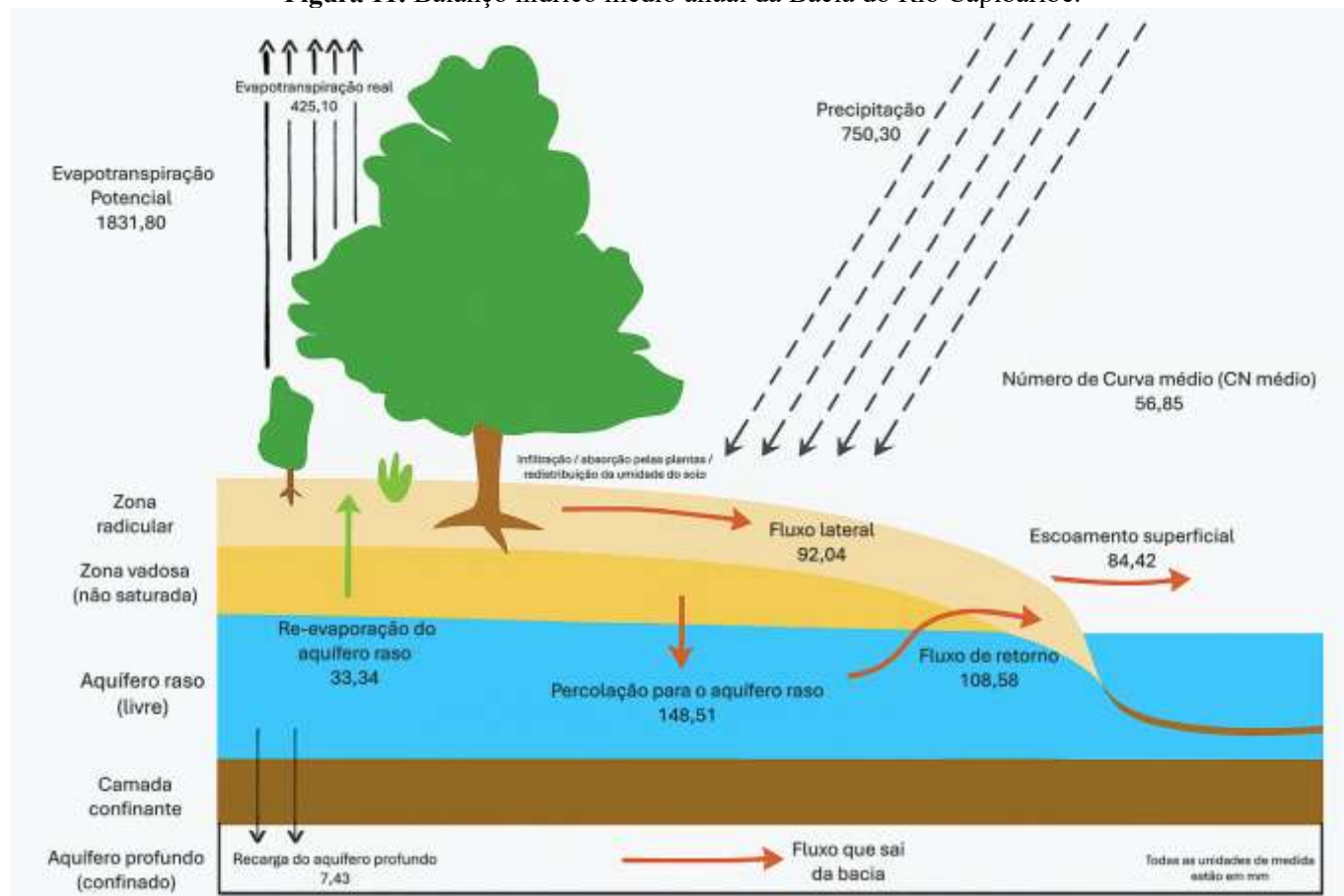
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Balanco hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe

A Figura 11 sintetiza o balanço hídrico médio anual da bacia do Rio Capibaribe. As projeções indicam precipitação de $\approx 750,3$ mm/ano, evapotranspiração potencial de 1831,8 mm e evapotranspiração real de $\approx 425,1$ mm. Assim, cerca de 56 % da água precipitada retorna à atmosfera, percentual elevado que reflete o regime térmico dominante — temperaturas médias superiores a 24 °C que estimulam forte demanda evaporativa. Consequentemente, apenas 44 % da chuva se converte em recarga subsuperficial ou escoamento superficial efetivo, limitando a disponibilidade hídrica destinada a rios e reservatórios.

Esse quadro não é homogêneo ao longo do curso do Capibaribe. Conforme Pinheiro (2023), no baixo curso — inserido na Zona da Mata Atlântica — prevalecem pluviometria mais alta e evapotranspiração mais baixa, reforçando a oferta hídrica local. Em contraste, o alto e o médio Capibaribe, de clima semiárido, combinam precipitações menores com taxas de evapotranspiração mais elevadas, o que reduz ainda mais o rendimento hídrico nestas sub-regiões. Essa variação espacial ressalta a necessidade de estratégias de gestão diferenciadas, capazes de equilibrar a escassez no agreste semiárido e o relativo excedente no setor litorâneo.

Figura 11: Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe.

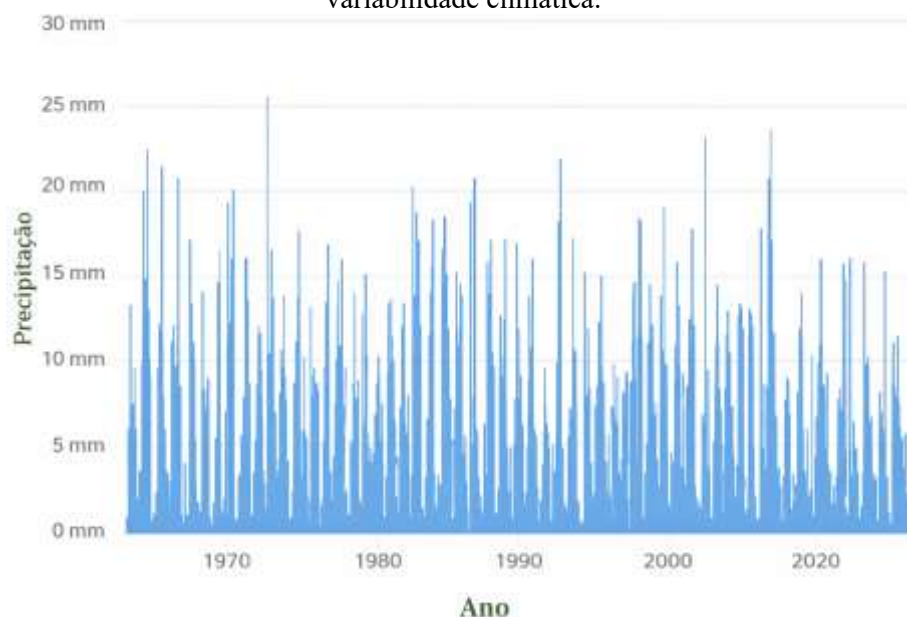


Fonte: SUPeR (2024), adaptado pelos autores.

O balanço hídrico indica que 19,8 % da precipitação percola no solo; desse volume, cerca de 22,45 % é retido pelo sistema radicular. O escoamento superficial atinge 84,42 mm, enquanto o fluxo lateral (subsuperficial) soma 92,04 mm. Já o escoamento de base corresponde a 108,58 mm, equivalendo a 14,48 % da chuva total.

Segundo Nóbrega e Santiago (2016), a América do Sul abriga três faixas semiáridas: Guajira (Venezuela/Colômbia), a diagonal seca do Cone Sul e o Nordeste brasileiro, este último marcado por altas temperaturas e forte variabilidade pluviométrica. Essa oscilação fica evidente na Bacia do Capibaribe: a Figura 12 mostra grandes flutuações nas médias diárias mensais de chuva ao longo da série histórica. Na última década, os índices caíram acentuadamente—exceção feita a 2011, que registrou picos pluviométricos—, permanecendo, em geral, entre 5 e 7 mm por dia. Marengo, Cunha e Alves (2016) atribuem essa redução à intensificação da alta subtropical do Atlântico, que suprimiu a convecção e agravou a seca no Nordeste, contexto que explica a retração pluviométrica observada na bacia.

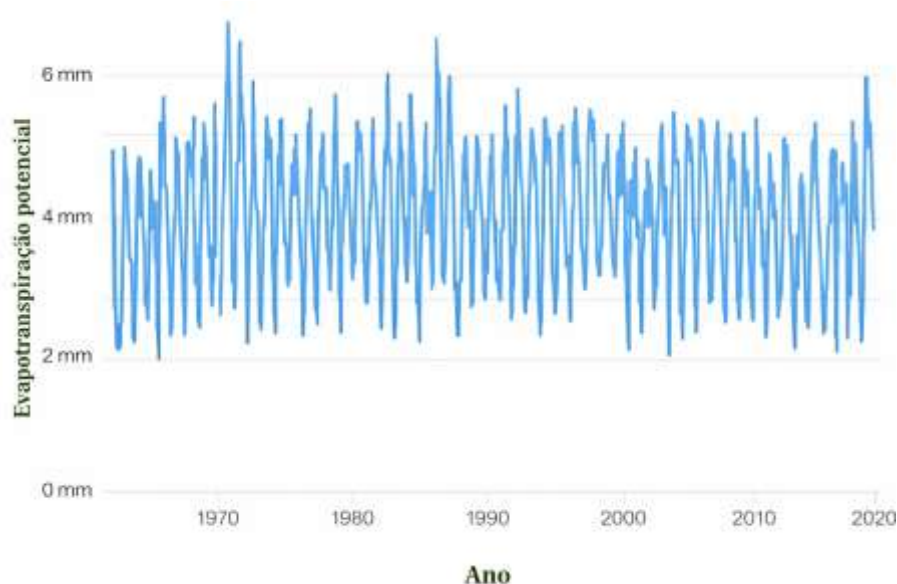
Figura 12: Média diária mensal da precipitação na Bacia do Rio Capibaribe sem aplicação de cenários de variabilidade climática.



Fonte: SUPer (2024).

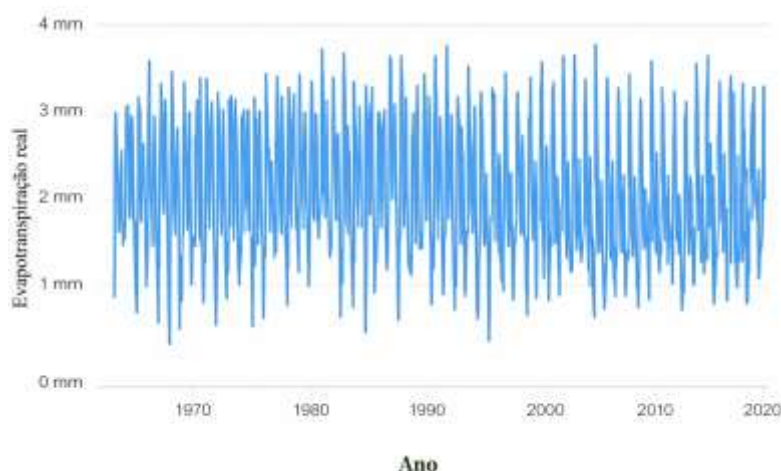
As Figuras 13 e 14 evidenciam as médias diárias mensais de evapotranspiração potencial e real, respectivamente. Segundo Tucci e Beltrame (2001), a evapotranspiração potencial corresponde ao volume de água que, em condições de cobertura vegetal baixa e suprimento hídrico ideal, retorna à atmosfera por evaporação e transpiração em determinado intervalo de tempo. Já Marcussi, Arantes e Wendland (2006) ressaltam que esse processo é fundamental no balanço hídrico para identificar períodos de excesso ou déficit hídrico.

Figura 13: Média diária mensal de evapotranspiração potencial na Bacia do Rio Capibaribe sem aplicação de cenários de variabilidade climática.



Fonte: SUPer (2024).

Figura 14: Média diária mensal de evapotranspiração real na Bacia do Rio Capibaribe sem aplicação de cenários de variabilidade climática.



Fonte: SUPer (2024).

Nas médias diárias mensais, a evapotranspiração potencial oscila entre 3 mm e 6 mm e mostra leve queda nos anos mais recentes. A evapotranspiração real, por sua vez, varia abaixo de 1 mm, podendo superar 3 mm em picos esporádicos. A partir de 2010, observa-se uma tendência geral de redução desses valores, em paralelo à diminuição da pluviosidade: menos chuva implica menor retenção de água no solo e na vegetação, resultando em taxas mais baixas de evaporação e transpiração. Ainda assim, episódios sazonais ou eventos climáticos específicos provocam eventuais elevações pontuais, padrão que também se reflete no regime de chuvas.

Balanços hídricos médios anuais da Bacia do Rio Capibaribe após a utilização da ferramenta de análise de sensibilidade e variabilidade climática

Brito *et al.* (2020) salientam que quantificar o balanço hídrico é fundamental para diagnosticar e antecipar os impactos das mudanças climáticas, seja em bacias hidrográficas pontuais, seja em regiões de porte continental. Ao registrar, de modo sistemático, todos os componentes de entrada e saída de água—precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração e recarga subterrânea—, o balanço fornece a base numérica que sustenta desde projeções de segurança hídrica até planos de uso do solo e de adaptação climática. Esse procedimento torna-se ainda mais crucial em áreas de clima semiárido, onde pequenos desvios no regime de chuvas ou na temperatura podem desencadear crises severas de abastecimento. Neste estudo, a Tabela 2 apresenta a síntese dos balanços hídricos simulados para a bacia do rio Capibaribe, gerados a partir da mesma esquematização presente na Figura 11, após a aplicação de sucessivos cenários de variabilidade climática por meio do módulo *Climate Sensitivity/Variability Analysis* do SUPer.

Tabela 3: Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe com aplicação dos conjuntos de variabilidade climática (2030-2099). Todas as unidades de medida estão em mm.

Conjunto	1	2	3	4	5	6	7
Precipitação	848,60	871,10	867,50	896,00	875,10	812,60	821,30
Evapotranspiração potencial	1873,90	1902,50	1928,00	1948,70	1981,80	2011,30	2046,70
Evapotranspiração real	450,50	457,10	456,70	460,80	450,20	435,70	437,40
Escoamento superficial	108,31	113,96	113,35	122,01	119,34	103,98	106,59
Fluxo lateral	105,49	108,39	107,52	111,01	107,23	98,23	99,14
Fluxo de retorno	139,89	146,18	144,17	155,08	151,15	129,46	132,04
Percolação p/ aquífero raso	183,65	190,97	189,26	201,40	197,70	174,55	178,02
Re-evaporação do aquífero raso	35,15	35,78	36,18	36,74	37,21	37,04	37,75
Recarga do aquífero profundo	9,18	9,55	9,46	10,07	9,89	8,73	8,90

Fonte: SUPer (2024), adaptado pelos autores.

Comparando-se esses cenários com o balanço de referência, observa-se um aumento expressivo nas taxas de evapotranspiração potencial e real (Tabela 3). O maior incremento da evapotranspiração real ocorre no Conjunto 4 (2060–2069), com alta de 8,40 %; o menor, no Conjunto 6 (2080–2089), limitado a 2,49 %. Curiosamente, o Conjunto 7 — que projeta elevação térmica de cerca de 4 °C — exibe um dos menores acréscimos de precipitação (9,45 %), evidenciando a resposta não linear desse elemento climático ao aquecimento. Nessa mesma condição de calor acentuado, a evapotranspiração real cresce modestos 2,89 %, enquanto a potencial se eleva de forma mais pronunciada. Esse contraste reforça o papel decisivo da temperatura no processo de evaporação, mesmo em cenários de menor disponibilidade hídrica.

Tabela 3: Alteração das evapotranspirações potenciais e reais entre cenários com aplicação de oscilações climáticas e o balanço hídrico de referência.

Cenário	Evapotranspiração Potencial	Evapotranspiração Real
1	+2,30%	+5,97%
2	+3,86%	+7,53%
3	+5,25%	+7,43%
4	+6,38%	+8,40%
5	+8,19%	+5,90%
6	+9,80%	+2,49%
7	+11,73%	+2,89%

Collischonn e Tucci (2014) apontam que, em condições normais, um incremento na precipitação tende a

reduzir a evapotranspiração real (ET real), pois o solo mais úmido diminui a necessidade de retirada de água pela vegetação e pela evaporação. Contudo, esse mecanismo se altera quando a temperatura sobe: quanto mais quente o ambiente, maior a energia disponível para transformar a água líquida em vapor e maior também a demanda atmosférica exercida sobre as plantas. Desse modo, mesmo em superfícies úmidas, a combinação de chuva adicional com temperaturas mais altas pode elevar a ET real.

A temperatura influi duplamente. Primeiro, acelera a evaporação direta do solo ao aumentar a pressão de vapor, favorecendo a passagem da água para a fase gasosa. Segundo, intensifica a transpiração vegetal, já que processos metabólicos e abertura estomática tornam-se mais ativos sob calor. Assim, em cenários com simultâneo aumento de precipitação e temperatura, a água extra que chega ao sistema pode ser rapidamente devolvida à atmosfera, resultando num balanço final positivo da ET real.

No que diz respeito às perdas percentuais de precipitação por evapotranspiração (Tabela 4), as projeções apontam variações relativamente pequenas em relação ao presente. À primeira vista, surpreende que, embora as taxas absolutas de ET (potencial e real) cresçam nos cenários futuros, a fração da chuva destinada à atmosfera não se altere na mesma proporção. Isso ocorre porque a disponibilidade hídrica adicional — produto do aumento pluviométrico — eleva o denominador da razão (chuva total), enquanto a resposta da vegetação e do solo a solos mais úmidos pode suavizar a intensificação evaporativa causada pelo calor. Em suma, a magnitude da perda depende do delicado equilíbrio entre oferta de água no solo, sensibilidade fisiológica das plantas e demanda atmosférica imposta por temperaturas mais elevadas.

Tabela 4: Perda percentual da precipitação por evapotranspiração real em cada cenário.

Cenário	Perda da precipitação por evapotranspiração real
Referência	56,7%
1	53,1%
2	52,5%
3	52,7%
4	51,4%
5	51,5%
6	53,6%
7	53,3%

Mesmo com maior evapotranspiração nos sete cenários avaliados, a vegetação tende a aproveitar melhor a água do solo, reduzindo perdas por enxurrada. Os resultados da Tabela 5 confirmam esse quadro: todos os fluxos hidrológicos aumentam em relação ao cenário de referência.

A percolação sobe 17-36 %, favorecendo a recarga aquífera; o escoamento lateral cresce 7-21 %, ampliando a água que chega rapidamente aos rios; o fluxo de base avança 19-43 %, garantindo vazões de estiagem; e o escoamento superficial aumenta 23-45 %, elevando a disponibilidade imediata, mas também o risco

de erosão. Além dos aquíferos costeiros e da Mata Pernambucana, o Agreste abriga sistemas fissurais em rochas cristalinas e unidades aluvionares (Borba *et al.*, 2017). Contudo, esses aquíferos são sobretudo sazonais: recarregam-se nas chuvas e esvaziam-se na seca, de modo que a principal contribuição ao fluxo de base provém das áreas litorâneas, onde a recarga é mais constante.

Tabela 5: Aumentos percentuais de percolação, escoamento lateral, fluxo de base e escoamento superficial entre cenários com aplicação de oscilações climáticas e o balanço hídrico atual.

Cenário	Aumento da percolação	Aumento do escoamento lateral	Aumento do fluxo de base	Aumento do escoamento superficial
1	23,66%	14,61%	28,84%	28,30%
2	28,59%	17,76%	34,63%	34,99%
3	27,44%	16,82%	32,78%	34,27%
4	35,61%	20,61%	42,83%	44,53%
5	33,12%	16,50%	39,21%	41,36%
6	17,53%	6,72%	19,23%	23,17%
7	19,87%	7,71%	21,61%	26,26%

As mudanças mapeadas nos componentes do ciclo hidrológico repercutem diretamente na oferta de água da bacia, alterando volumes anuais, ritmo sazonal e regularidade das vazões. Esses achados devem ser incorporados às estratégias de gestão, a fim de garantir o uso sustentável dos recursos frente aos desafios impostos pela variabilidade climática e pelo aquecimento global.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do balanço hídrico na Bacia do Rio Capibaribe trouxe à tona uma compreensão detalhada dos padrões hidrológicos da região, revelando os desafios presentes e futuros diante das mudanças climáticas. Os dados coletados mostram que a bacia, já sob pressão, enfrenta dificuldades significativas em termos de retenção de água, com grande parte da precipitação sendo perdida por evapotranspiração, o que evidencia sua vulnerabilidade hídrica. As projeções climáticas para o futuro reforçam a complexidade das interações entre temperatura, precipitação e seus efeitos no balanço hídrico. As simulações indicam um aumento tanto na evapotranspiração potencial quanto na real, sinalizando mudanças importantes no ciclo hidrológico da bacia.

Curiosamente, enquanto a evapotranspiração real apresentou um crescimento moderado com o aumento da temperatura, a evapotranspiração potencial cresceu de forma mais acentuada. Um dado intrigante surge ao observar as perdas percentuais de precipitação por evapotranspiração: apesar do aumento dessas taxas, as perdas de precipitação projetadas para o futuro diminuiriam. Isso sugere uma interação mais complexa entre temperatura, precipitação, eficiência do uso da água pelas plantas e a

disponibilidade hídrica no solo.

Essas interações precisam ser melhor compreendidas para uma interpretação adequada dos padrões hidrológicos futuros. Dentre os sete cenários projetados, o cenário 4 (década de 2060- 2069) se destacou como o mais crítico. Nesse cenário, a evapotranspiração real apresentou o maior aumento percentual, atingindo 8,40%, o que sugere um aumento significativo na demanda atmosférica por água. Esse crescimento acentuado acende um alerta para a necessidade de estratégias de adaptação urgentes nos próximos anos.

As mudanças esperadas no comportamento hidrológico, envolvendo parâmetros como precipitação, temperatura e evapotranspiração, refletem o impacto potencial do agravamento das mudanças climáticas, tanto em escala global quanto regional. Diante disso, torna-se imprescindível a implementação de políticas públicas voltadas à gestão integrada dos recursos hídricos da Bacia do Rio Capibaribe, com o objetivo de mitigar esses impactos e garantir a disponibilidade de água em cenários climáticos adversos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado ao primeiro autor, durante o período em que esteve vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), entre abril de 2022 e janeiro de 2024, apoio que foi fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE – CPRH. **Relatório de monitoramento de bacias hidrográficas do Estado de Pernambuco**. Recife: CPRH, 200p, 2019.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA - APAC. **Bacias Hidrográficas**. Disponível em: <http://200.238.107.184/bacias-hidrograficas>. Acesso em setembro de 2022.

ANDRADE, C. W. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; LIMA, J. R. S.; SRINIVASAN, R.; JONES, C. A. **Soil moisture and discharge modeling in a representative watershed in northeastern Brazil using SWAT**. *Ecohydrology & Hydrobiology*, v.19, n.2, p.238-251, 2019.

BORBA, A. L. S.; COSTA, M. R. da; LIMA, E. de A. M.; TORRES, F. S. de M. **Diagnóstico das Condições Explotáveis de uma Porção do Agreste de Pernambuco a partir do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas**. In: XXII SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis – SC, p.1-8, 2017.

BRESSIANI, D. de A.; SRINIVASAN, R.; JONES, C. A.; MENDIONDO, E. M. **Effects of different spatial and temporal weather data resolutions on the stream flow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil**. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v.8, n.3, p.1-16,

2015.

BRITO, T. R. C.; LIMA, J. R. S.; OLIVEIRA, C. L.; SOUZA, R. M. S.; ANTONINO, A. C. D.; MEDEIROS, E. V.; SOUZA, E. S.; ALVES, E. M. **Mudanças no Uso da Terra e Efeito nos Componentes do Balanço Hídrico no Agreste Pernambucano.** Revista Brasileira de Geografia Física, v.13, p.870-886, 2020.

COLLISCHONN, B.; TUCCI, C. E. M. **Relações Regionais entre Precipitação e Evapotranspiração Mensais.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.19, n.3, p.205-214, 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Solos Tropicais.** Brasília, 2021.

FARAMARZI, M.; ABBASPOUR, K. C.; VAGHEFI, S. A.; FARZANEH, M. R.; ZEHNDER, A. J. B.; SRINIVASAN, R.; YANG, H. **Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa.** Journal of Hydrology, v.480, p.85-101, 2013.

FARIAS, C. W. L. de A.; MIRANDA, R. de Q.; VIANA, J. F. de S.; LINS, F. A. C.; GALVÍNCIO, J. D. **Calibrações Parciais do Modelo SWAT como Suporte ao Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco.** Anais do XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, ed.10, 2020.

FARIAS, C.; MIRANDA, R.; VIANA, J.; LINS, F.; PEREIRA, J. A.; URSULINO, B.; MONTENEGRO, S.; GALVÍNCIO, J.; MONTENEGRO, A.; SRINIVASAN, R. **Calibration of SWAT model in the Pernambuco state watersheds to support the SUPER system.** Revista Brasileira de Geografia Física, v.16, n.6, p.3572-3592, 2023.

FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; CRUZ, C. D. **On Frontal Zone Analysis in the Tropical Region of the Northeast Brazil.** Pure and Applied Geophysics, v.173, p.1403–1421. 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report.** Geneva, Switzerland, 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Synthesis report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6).** Geneva, Switzerland, 2023.

MARCUSSI, F. F. N.; ARANTES, E. J.; WENDLAND, E. C. **Avaliação de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial e direta para a região de São Carlos-SP.** In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, Curitiba – PR, 2006. Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Porto Alegre - RS : ABRH, v.1. p.21, 2006.

MARENGO, J. A. (COORD.); NOBRE, C. A.; CHOU, S. C.; TOMASELLA, J.; SAMPAIO, G.; ALVES, L. M.; OBREGÓN, G. O.; SOARES, W. R.; BETTS, R.; KAY, G. **Riscos das mudanças climáticas no Brasil: Análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia.** Projeto colaborativo realizado pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do Brasil e o Met Office Hadley Centre (MOHC) do Reino Unido, 2011.

MARENGO, J. A., CUNHA, A. P., ALVES, L. M. **A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico.** Revista Climanalise, v.3, p.49-54, 2016.

NANGOMBE, S.; FARAMARZI, M.; BEEVERS, L. **Assessing the impacts of climate change on water resources using SWAT: A review.** Science of The Total Environment, p.724-737, 2020.

- NÓBREGA, R. S.; SANTIAGO, G. A. C. F. **Tendências do controle climático oceânico sob a variabilidade temporal da precipitação no Nordeste do Brasil.** Revista de Geografia Norte Grande, V.63, p.9-26, 2016.
- PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – PBMC. **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas** [Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil, 184p, 2016.
- PERNAMBUCO. **Climatologia das estações experimentais do IPA.** Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária – IPA, Recife – PE, p.137, 1994.
- PINHEIRO, N. V. **Modelagem Hidrológica e o Pagamento por Serviços Ambientais no Processo Decisório para a Conservação De Bacias Hidrográficas.** Tese (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 144p, 2023.
- SECRETARIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE - SECTMA. **Diagnóstico dos recursos hídricos da bacia do rio Goiana e dos grupos de bacias de pequenos rios litorâneos GL-1 e GL-6.** Recife - PE, 2003.
- SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. **Plano Hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe.** Recife, 936p, 2010.
- SØRLAND, S. L.; BROGLI, R.; POTHAPAKULA, P. K.; RUSSO, E.; VAN DE WALLE, J.; AHRENS, B.; ANDERS, I.; BUCCHIGNANI, E.; DAVIN, E. L.; DEMORY, M.-E.; DOSIO, A.; FELDMANN, H.; FRÜH, B.; GEYER, B.; KEULER, K.; LEE, D.; LI, D.; VAN LIPZIG, N. P. M.; MIN, S.-K.; PANITZ, H.-J.; ROCKEL, B.; SCHÄR, C.; STEGER, C.; THIERY, W. **COSMO-CLM regional climate simulations in the Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) framework: a review.** Geoscientific Model Development, v.14, p.5125–5154, 2021.
- SOUSA, W. S.; VIANA, J. F. S.; SILVA, R. R. da; IRMÃO, R. A. **Estimativa do balanço hídrico de uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema com o Modelo SWAT.** Journal of Environmental Analysis and Progress, v.3, n.1, p.146-154, 2018.
- TIBÚRCIO, I. M.; SILVEIRA, N. T.; SANTOS, T. O.; MIRANDA, R. Q.; GALVÍNCIO, J. D. **Balanço Hídrico e Mudanças Climáticas no Semiárido Pernambucano: aplicabilidade do Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco (SUPER).** Revista Brasileira de Geografia Física, v.16, n.3, p.1657-1670, 2023.
- TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. **Evaporação e Evapotranspiração.** In: Hidrologia – Ciência e Aplicação. 2. ed.; 2. reimpr. Porto Alegre, Ed. Universidade/UFRGS: ABRH. 943p, 2001.
- URSULINO, B. e S.; FARIAS, V. E. M. de; SILVA, S. F. da; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Respostas da Vegetação à Dinâmica de Variáveis Hidroclimatológicas Utilizando Sensoriamento Remoto na Bacia do Rio Capibaribe-PE.** In: XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju – SE, p.1-9, 2023.
- VIANA, J. F. S.; MONTENEGRO, S. M. G.; SILVA, B. B. da; SILVA, R. M. da; SOUSA, W. S. **Modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama - PE utilizando o modelo SWAT.** Journal of Environmental Analysis and Progress, v.3, n.1, p.155-172, 2018.
- ZANELLA, M. E. **Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do Semiárido Nordestino.** Caderno Prudentino de Geografia, v.esp, n.36, p.126-142, 2014.