

Precipitação mensal histórico e futura para a Paraíba entre 1970 a 2060 simulada por modelos MIROC6 e CMIP6-SSP126/245

Historical and future monthly precipitation for Paraíba between 1970 and 2060 simulated by MIROC6 and CMIP6-SSP126/245 models

Paulo Roberto Megna Francisco¹, José Hugo Simplicio de Sousa¹, George do Nascimento Ribeiro¹,
José Nilton Silva¹, Raimundo Calixto Martins Rodrigues²

¹Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil

²Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, Brasil

Contato:paulomegna@gmail.com

Keyword

modelos climáticos
precipitação
temperatura
distribuição espacial
variabilidade

RESUMO

Nas últimas décadas, tanto os modelos climáticos globais, quanto os modelos climáticos regionais, têm tido grandes avanços na representação dos componentes do sistema climático, principalmente devido à melhor representação dos processos físicos e fenômenos a eles associados e as suas interações. Este trabalho objetivou inferir a variabilidade espacial da precipitação e a relação com a temperatura mínima e máxima simuladas por modelos climáticos de alta resolução do CMIP6 para 2 cenários de emissões futuras para o Estado da Paraíba. Foi utilizado a base digital da WorldClim® v2.1 de dados entre 1970 a 2060 do modelo climático global CMIP6 de dados mensais históricos e dos cenários SSP2 4.5 e SSP5 8.5. As variáveis climáticas avaliadas foram temperatura mínima média mensal, temperatura máxima média mensal, e precipitação total mensal. Utilizando o RStudio® 2025 foram elaborados os gráficos estatísticos dos meses representativos de novembro, fevereiro e junho, da distribuição da precipitação da série temporal, e do efeito da temperatura máxima na precipitação média e mínima. O modelo climático MIROC6 proporcionou bons resultados na simulação das tendências futuras da precipitação e temperatura em relação aos dados históricos da base CPMI6. Constatou-se variabilidade espacial da precipitação com o uso dos cenários futuros para a quadra chuvosa. Na relação do efeito da temperatura máxima houve tendência positiva de aumento até 2°C em alguns meses do ano devido a probabilidade de menor ocorrência de precipitação com o uso das forçantes.

Palavras-Chave

climate models
precipitation temperature
spatial distribution
variability

ABSTRACT

In recent decades, both global and regional climate models have made significant advances in representing the components of the climate system, mainly due to better representation of physical processes and associated phenomena and their interactions. This work aimed to infer the spatial variability of precipitation and its relationship with minimum and maximum temperatures simulated by high-resolution CMIP6 climate models for two future emission scenarios for the state of Paraíba. The WorldClim® v2.1 digital database was used, containing data from 1970 to 2060 from the CMIP6 global climate model with historical monthly data and the SSP2 4.5 and SSP5 8.5 scenarios. The climatic variables evaluated were average monthly minimum temperature, average monthly maximum temperature, and total monthly precipitation. Using RStudio® 2025, statistical graphs were created for the representative months of November, February, and June, showing the precipitation distribution of the time series, and the effect of maximum temperature on average and minimum precipitation. The MIROC6 climate model provided good results in simulating future precipitation and temperature trends in relation to historical data from the CPMI6 database. Spatial variability of precipitation was observed using future scenarios for the rainy season. In relation to the effect of maximum temperature, there was a positive upward trend of up to 2°C in some months of the year due to the probability of lower precipitation occurrence with the use of forcing factors.

Informações do artigo

Recebido: 25 de novembro, 2025
Aceito: 13 de dezembro, 2025
Publicado: 30 de dezembro, 2025

Introdução

A região Nordeste tem um histórico de secas (MARENGO & BERNASCONI, 2015; MARENGO *et al.*, 2020), dentre essas, destaca-se a seca plurianual na região entre 2011-2018 (MARENGO *et al.*, 2017; CUNHA *et al.*, 2018).

De acordo com Marengo *et al.* (2012), nas últimas décadas, tanto os modelos climáticos globais (MCGs), quanto os modelos climáticos regionais (MCRs), têm tido grandes avanços na representação dos componentes do sistema climático, principalmente devido à melhor representação dos processos físicos e fenômenos a eles associados e as suas interações.

A variabilidade interna do sistema climático é uma das principais fontes de incerteza nas projeções de mudanças climáticas futuras, especialmente em escalas regionais e de curto prazo (HAWKINS & SUTTON, 2011; LEHNER *et al.*, 2020).

Uma das possibilidades de abordar e compreender o comportamento dos eventos extremos de precipitação no clima futuro é utilizar as simulações e projeções climáticas dos *Earth System Models* (ESMs) do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP). Atualmente, estão disponíveis três gerações de modelos CMIP: CMIP3 (MEEHL *et al.*, 2007), CMIP5 (TAYLOR *et al.*, 2012) e CMIP6 (EYRING *et al.*, 2016).

Além disso, os modelos CMIP6 incluem uma maior resolução espacial, uma vasta gama de cenários, uma maior sensibilidade climática e uma complexidade física adicional em relação às versões CMIP anteriores (BOCK *et al.*, 2020). Essa melhoria contínua dos ESMs é enfatizada em alguns estudos, onde demonstram que a evolução ao longo das gerações CMIP reduziu as incertezas do modelo para algumas áreas (BLÁZQUEZ & NUNEZ, 2013; GUSAIN *et al.*, 2020; SRIVASTAVA *et al.*, 2020; SRIVASTAVA *et al.*, 2020; SRIVASTAVA *et al.*, 2020; UKKOLA *et al.*, 2020; LUO *et al.*, 2021).

Pesquisas diversas foram realizadas no Brasil com o CMIP6, como por Francisco *et al.* (2025; 2024a), Bosco e Valverde (2022), Correa *et al.* (2022), Ferreira e Valverde (2022), Santos *et al.* (2020), Ávila-Díaz *et al.* (2020), Natividade *et al.* (2017), Lyra *et al.* (2017) e Jones e Carvalho (2013).

A versão 2 do WorldClim® contém dados climáticos médios mensais em grade para o período 1970-2000 com diferentes resoluções espaciais, de 30 segundos ($\sim 1 \text{ km}^2$) a 10 minutos ($\sim 340 \text{ km}^2$). O conjunto de dados inclui as principais variáveis climáticas (temperatura mínima, média e máxima mensal, precipitação, radiação solar, velocidade do vento e pressão de vapor de água), bem como 19 variáveis bioclimáticas derivadas. As correlações globais de validação cruzada foram $\geq 0,99$ para temperatura e umidade, 0,86 para precipitação e 0,76 para velocidade do vento (FICK & HIJMANS, 2017).

Os cenários de emissões *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), fazem parte de uma nova estrutura de cenários, a fim de facilitar a análise integrada de futuros impactos climáticos, vulnerabilidades, adaptação e mitigação (RIAHI *et al.*, 2017).

O WorldClim® também já foi utilizado em outras aplicações como eco-hidrologia (IMBACH *et al.*, 2010), em climatologia (MORENO & HASENAUER, 2016), na

avaliação de estoques de carbono e suas mudanças (YIGINI & PANAGOS, 2016; LUGATO *et al.*, 2016) e para modelagem de erosão (PANAGOS *et al.*, 2017; BALLABIO *et al.*, 2017).

De acordo com Shiogama *et al.* (2019), o modelo climático MIROC6 inclui os componentes aerossóis SPRINTARS6.0, atmosfera CCSR AGCM, terra MATSIRO6.0, oceano e gelo marinho COCO4.9. O MIROC têm resoluções nominais nativas de aerossol, atmosfera e terra com 250 km, oceano e gelo marinho com 100 km. O projeto inclui simulações de cerca de 120 modelos climáticos globais. Os dados fornecem base para pesquisas climáticas destinadas a questões científicas fundamentais.

Shiogama *et al.* (2023), afirmam que os conjuntos de grande escala (LEs) com condições iniciais de um único modelo são uma abordagem útil para compreender o papel das respostas forçadas e da variabilidade interna nas mudanças climáticas históricas e futuras.

Além das simulações históricas com todos os forçantes, os experimentos históricos com forçantes individuais são importantes para estudos de detecção e atribuição de mudanças climáticas históricas e para a compreensão do papel da variabilidade interna nas mudanças climáticas históricas observadas (WATANABE *et al.*, 2014; SHIOGAMA *et al.*, 2016; GILLETT *et al.*, 2021; WATANABE *et al.*, 2021).

O estudo das distribuições de variáveis, como um meio de compreender os fenômenos meteorológicos, para determinar seus padrões de ocorrência e permitir uma previsibilidade razoável do comportamento climático de uma região, é uma ferramenta de grande valor para o planejamento e gestão de inúmeras atividades agropecuárias e humanas. As previsões probabilísticas auxiliam no planejamento e condução das atividades agropecuárias, ao racionalizar os procedimentos e evitar ou minimizar os possíveis prejuízos causados pela ação das intempéries (ASSIS *et al.*, 2004).

As distribuições de probabilidade contínuas são utilizadas em diversos trabalhos probabilísticos (ASSIS *et al.*, 2004; CATALUNHA *et al.*, 2002; LYRA *et al.*, 2006; JUNQUEIRA JÚNIOR *et al.*, 2007), devido o ajustamento de suas variáveis, que pode até não ser perfeito, mas descrevem bem uma situação real, fornecendo respostas às hipóteses que podem ter sido levantadas na pesquisa (ARAUJO *et al.*, 2010).

Portanto, este trabalho objetiva inferir a variabilidade espacial da precipitação e a relação com a temperatura simuladas por modelos climáticos de alta resolução do CMIP6 para 2 cenários de emissões futuras para o Estado da Paraíba.

Material e Métodos

O Estado da Paraíba localiza-se na região Nordeste Brasileira, apresenta área de 56.372 km². Posiciona-se entre os paralelos 6°02'12"S e 8°19'18"S, e os meridianos de 34°45'54"W e 38°45'45"W (FRANCISCO, 2010).

O clima caracteriza-se por temperaturas médias elevadas (22 a 30°C) e uma amplitude térmica anual muito pequena, em função da baixa latitude e elevações (<700m). A precipitação varia de 400 a 800mm anuais, nas regiões interiores semiáridas, e no Litoral, mais úmido, pode ultrapassar aos 1.600mm (VAREJÃO-SILVA *et al.*, 1984).

De acordo com a classificação climática de Köppen, o Estado apresenta o clima 'Aw', caracterizado na região do

Litoral norte, o clima tipo ‘Am’ no Litoral norte e Sul, o tipo climático ‘As’ nas regiões parcial Litorânea, Brejo, Agreste e do Sertão e em toda área do Alto Sertão. O tipo climático ‘Bsh’ predomina na região do Cariri/Curimataú e do Sertão (FRANCISCO *et al.*, 2015).

Na realização deste trabalho foi utilizado a base digital da WorldClim® v2.1 de dados entre 1970 a 2060 em downscaling classificado por *time-slices* do modelo climático global CMIP6 (EYRING *et al.*, 2016) de resolução espacial de 5 arc-min (~10 km) de dados mensais históricos e dos cenários SSP2 4.5 e SSP5 8.5 do projeto MIROC6 (AORI, 2025).

As variáveis climáticas avaliadas foram temperatura mínima média mensal (°C), temperatura máxima média mensal (°C), e precipitação total mensal (mm), todas adquiridas em formato *tif*.

Utilizando o RStudio® 2025 e um *script* adaptado de Shabbir (2025), com os dados obtidos, foram elaborados os gráficos estatísticos dos meses representativos de novembro, fevereiro e junho, da distribuição da precipitação da série temporal, como também o efeito da temperatura máxima na precipitação média e mínima dos respectivos meses representativos.

Foi utilizado arquivo *shape* dos limites da área de estudo do IBGE (2021) para a máscara utilizada no processamento no RStudio® na elaboração dos mapas. No processamento estatístico foi utilizada a distribuição normal dos dados.

A Distribuição Normal tem função densidade de probabilidade conforme a Equação 1 (ASTOLPHO *et al.*, 2005; MARTIN *et al.*, 2007).

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right); \text{ para } -\infty < x < +\infty \quad (\text{Eq.1})$$

Onde: μ é a média.

A probabilidade de que x assume valores menores ou iguais a um dado x quando x é $N(\mu, \sigma^2)$, é estimada pela Equação 2.

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (\text{Eq.2})$$

Essa equação não pode ser resolvida analiticamente sem o uso de métodos de integração aproximada. Por esse motivo, usa-se a transformação $Z = (x - \mu)/\sigma$, onde a variável Z tem distribuição Normal com média zero e variância um [$N(0,1)$].

A variável Z é denominada variável reduzida e reescrita conforme a Equação 3.

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz; \text{ para } -\infty < z < +\infty \quad (\text{Eq.3})$$

Resultados e Discussão

Pelos resultados obtidos, observa-se pela Figura 1, da quadra chuvosa, quanto a distribuição da precipitação no mês de abril, que apresenta diminuição e variabilidade nos resultados obtidos das forçantes na região do Litoral e Agreste de ~300 para 240mm, no Brejo sob o Planalto da Borborema, de 170 para 150mm, e Sertão 250 para 220mm, em relação ao histórico.

Francisco *et al.* (2024b), identificaram precipitações totais anuais inferiores a 700mm que ocorrem no Planalto da Borborema e Agreste da Paraíba, regiões mais secas. Francisco *et al.* (2016) concluíram que, a distribuição da precipitação pluviométrica ocorre de forma irregular e com grande variação ao longo do ano em todo o Estado.

Em regiões como o Nordeste do Brasil, principalmente no semiárido, a precipitação é uma variável determinante das condições do clima local, bem como da sua variabilidade e mudança em longo prazo (SANTOS *et al.*, 2009).

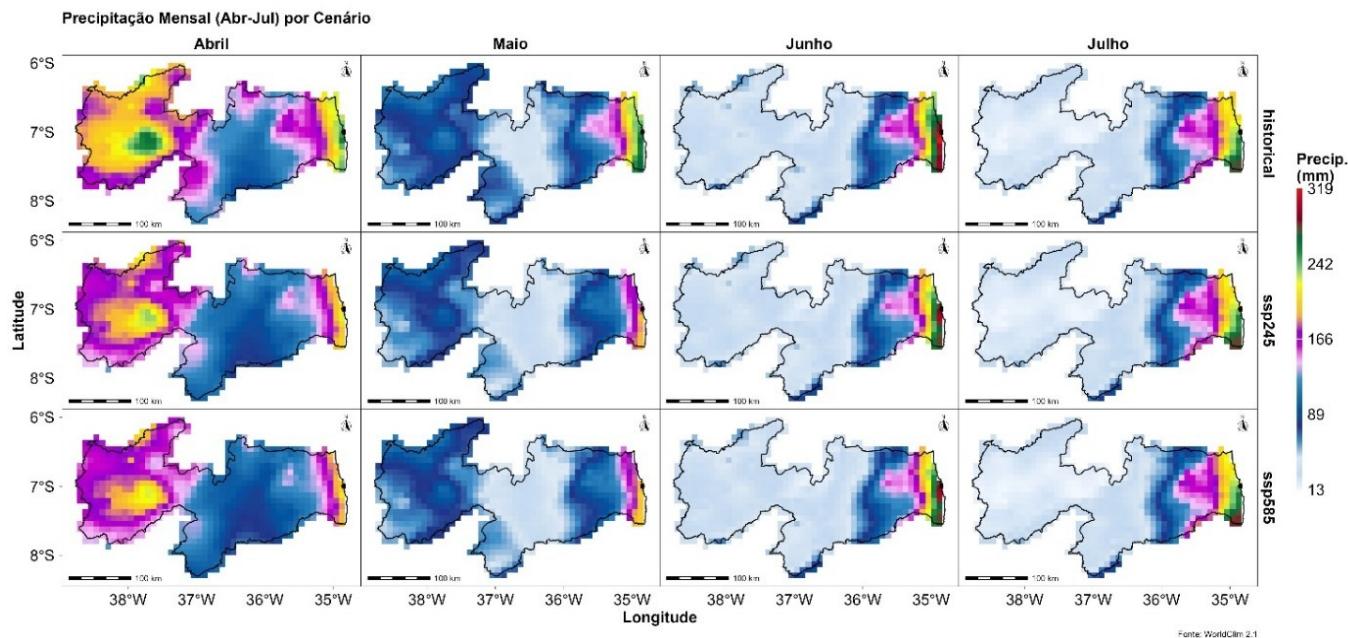
Para o mês de maio, observa-se a precipitação diminuir na região do Litoral de ~270 para 230mm quanto ao prognóstico das forçantes SSP245/585.

Os meses de junho e julho apresentam precipitação máxima histórica de 319mm no Litoral com destaque a região sul litorânea, e quanto as forçantes apresentam menor diferença na região do Agreste. Devido à significativa variabilidade espacial da precipitação anual no Nordeste, a avaliação dos impactos climáticos é frequentemente segregada por regiões climáticas distintas, como Sertão/Agreste e Zona da Mata (ARAÚJO *et al.*, 2024).

De acordo com Hastenrath e Heller (1977), o Litoral é a região com os maiores índices pluviométricos do Estado, sendo que na região do Litoral Sul, a pluviometria é ainda mais elevada.

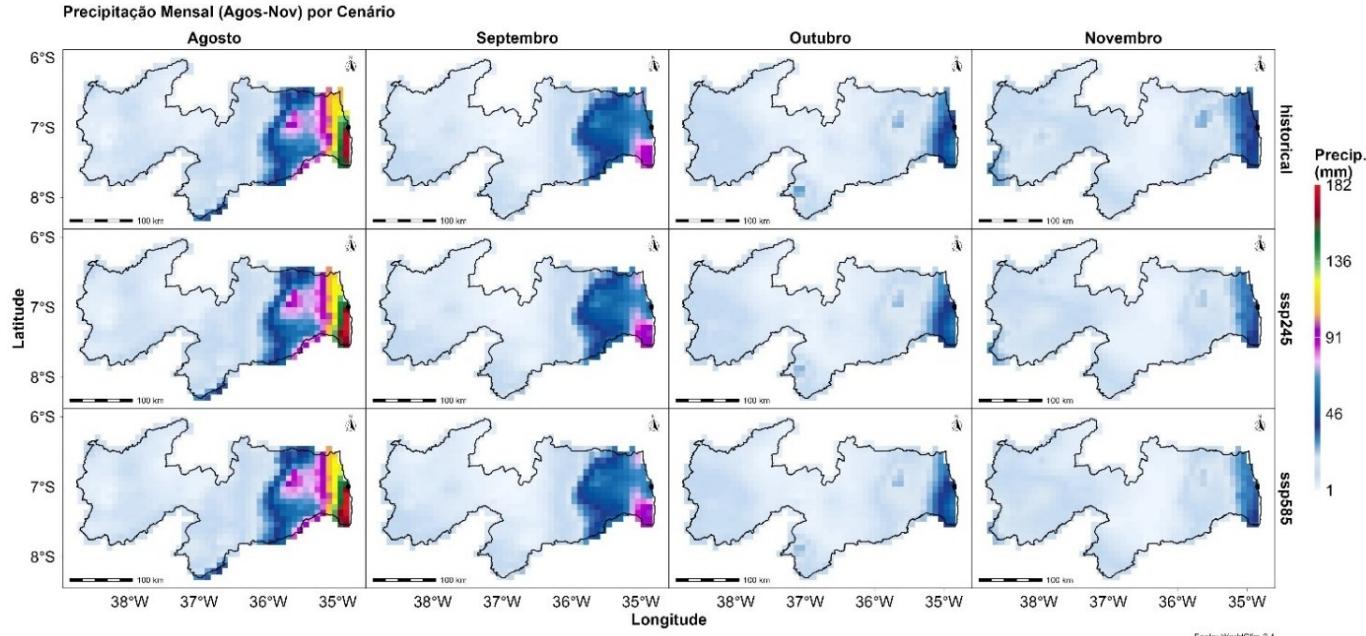
Na Figura 2 representativo da distribuição espacial da precipitação entre os meses de agosto a novembro, pode-se observar que agosto histórico apresenta média máxima de 182mm distribuído no Litoral, Agreste e Brejo, e não apresentando diferença significativa entre as forçantes SSP245/585.

Figura 1. Precipitação mensal do quadrimestre chuvoso de abril a julho por cenário



Fonte: Adaptado do WorldClim® 2.1 (FICK & HIJMANS, 2017); CPMI6 (EYRING *et al.*, 2016)

Figura 2. Precipitação mensal do quadrimestre de agosto a novembro por cenário



Fonte: Adaptado do WorldClim® 2.1 (FICK & HIJMANS, 2017); CPMI6 (EYRING *et al.*, 2016)

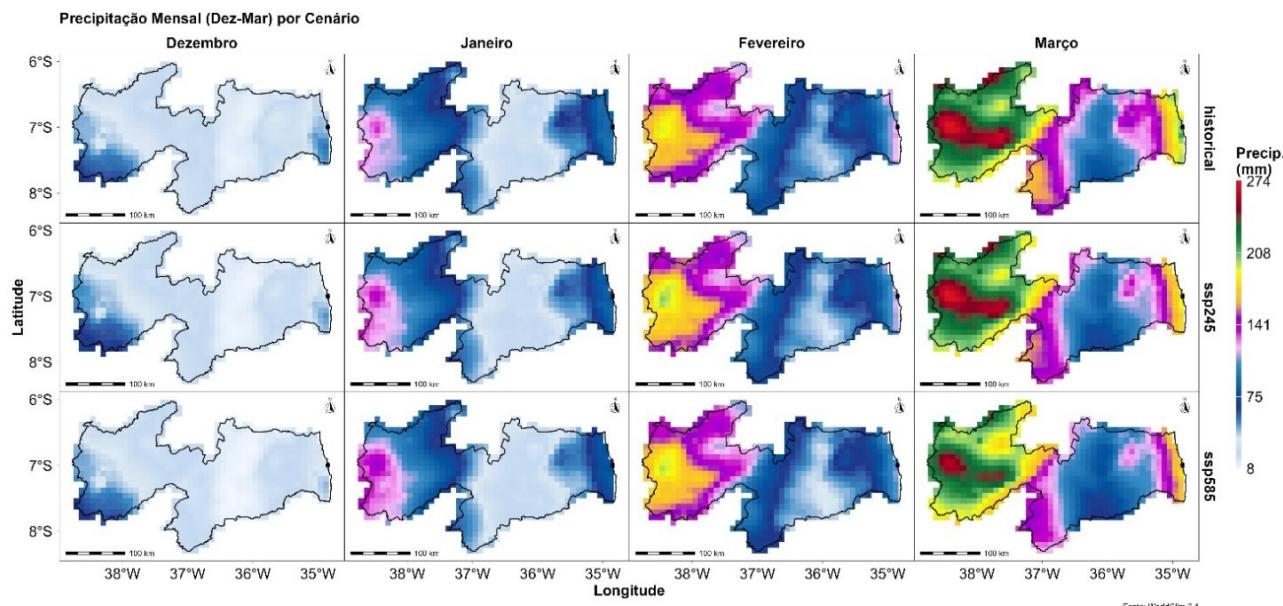
No mês de setembro apresenta o mesmo comportamento, no entanto com precipitação de ~70mm até a região dos contrafortes do Planalto da Borborema, e de ~100mm na região litorânea sul.

Entre outubro e novembro o comportamento é similar com pluviósidade máxima de ~70mm distribuída por todo a faixa litorânea. Observa-se que nesta quadra, as forçantes não apresentam diminuição significativa na região.

Quanto a quadra dos meses de dezembro a março (Figura 3), observa-se menor variabilidade da distribuição espacial da precipitação entre os dados histórico e o cenário futuro das forçantes SSP245/585. No cenário SSP585 para 2060 para a região do Sertão, apresenta aumento no mês de

janeiro e pequena diminuição em março com máximas de 274mm. Melo *et al.* (2025), ao analisarem bacias hidrográficas no Semiárido Brasileiro, notaram que, embora haja uma tendência geral de redução, a magnitude e o sinal da precipitação variam significativamente por modelo e por sub-bacia, o que sublinha a complexidade na representação do ciclo hidrológico regional. Souza *et al.* (2022), observaram que o Estado da Paraíba se destaca pela grande heterogeneidade da precipitação máxima e pela presença de períodos chuvosos distintos em cada mesorregião. Já Francisco *et al.* (2024b), evidenciaram que ocorre a distribuição irregular e altamente variável da precipitação pluviométrica ao longo dos anos no Estado da Paraíba.

Figura 3. Precipitação mensal do quadrimestre de dezembro a março por cenário

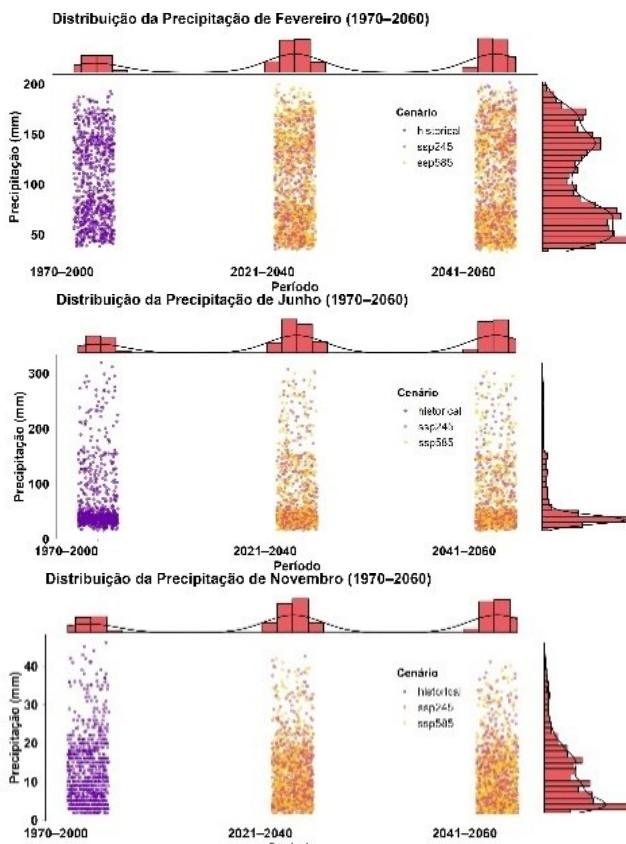


Fonte: Adaptado do WorldClim® 2.1 (FICK & HIJMANS, 2017); CPMI6 (EYRING *et al.*, 2016)

Quanto a distribuição da precipitação entre os cenários dos meses selecionados como representativos (Figura 4), observa-se que no mês de fevereiro o comportamento apresenta maior representatividade em 50mm, diminuindo entre 100mm e atingindo outro pico em 125mm e diminuindo gradativamente até 200mm.

Este comportamento está relacionado com as chuvas de verão que ocorrem na região do Sertão entre meados de dezembro até março.

Figura 4. Distribuição da precipitação de fevereiro, julho e novembro por cenário



Em relação ao mês representativo de junho, observa-se que os valores da precipitação se concentram até 50mm nos dados históricos e nos cenários futuros, apresentando normalidade na sua distribuição.

No mês representativo de novembro da distribuição da precipitação de maior ocorrência de valores de 5mm diminuindo gradativamente até 40mm. Não ocorre grande influência futura das forçantes, talvez devido este período do ano não haver normalmente a ocorrência de precipitação em quase toda área de estudo.

De acordo com Bosco e Valverde (2022), as projeções climáticas de precipitação em cenários futuros nas escalas global, regional e sub-regional, continuam não tendo consenso, o que ainda denota altas incertezas, assunto este levantado no relatório (AR6) (IPCC, 2021).

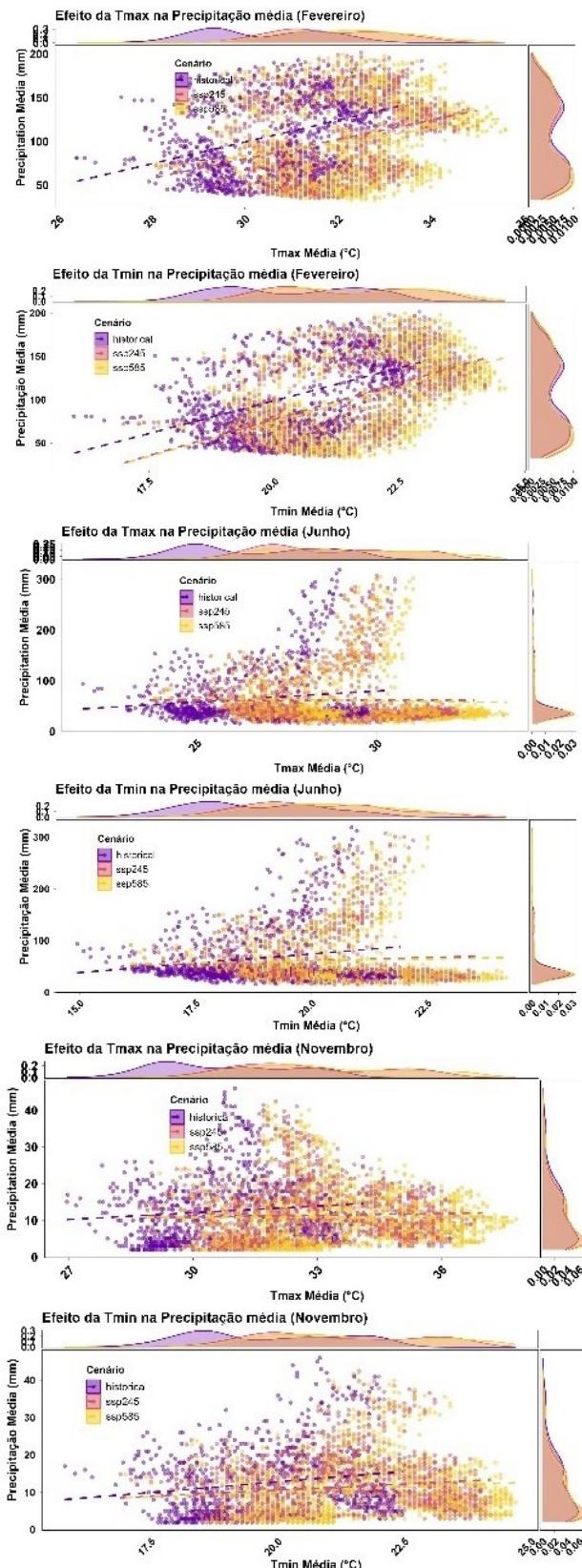
Através da Figura 5 pode-se verificar o comportamento do efeito das temperaturas máximas e mínimas na precipitação média que ocorre no Estado da Paraíba nos meses representativos.

O efeito no mês de fevereiro da temperatura máxima com o uso das forçantes, a probabilidade pode atingir ~35°C com máxima de precipitação média de 200mm, demonstrando a tendência de aumento de 1°C e de menor ocorrência da precipitação com tendência de diminuição de ~5mm.

No efeito da temperatura mínima observa-se a probabilidade de acréscimo de 2°C não ultrapassando os 24°C e a tendência de menor ocorrência de precipitação de ~5mm. Essa elevação é coerente com o observado em estados adjacentes, visto que Araujo *et al.* (2024) projetaram, para o Estado de Pernambuco, aumentos de temperatura que variam entre 1,64°C e 4,53°C nos cenários SSP245 e SSP585, respectivamente, reforçando a magnitude do aquecimento projetado para a região.

Observa-se ainda, tendência positiva, mas com maior influência das temperaturas mínimas e máximas na distribuição das chuvas. Salviano *et al.* (2016) constataram que, nos meses mais secos, a precipitação apresentou tendências positivas na região da Nordeste, resultado similar a este trabalho.

Figura 5. Efeito da temperatura máxima e mínima na precipitação média dos meses de fevereiro, julho e novembro por cenário



Para o mês representativo de junho, pertencente a quadra chuvosa, observa-se que o efeito da temperatura máxima na precipitação média apresenta tendência positiva nas forçantes SSP245/585.

Comportamento similar ocorre no efeito da temperatura mínima. Hastenrath (2000), afirma que o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), pode ser a explicação das tendências positivas de chuva na região Nordeste.

No entanto, Francisco *et al.* (2025) observaram que, a correlação entre a precipitação e a temperatura máxima apresentou em sua maioria muito forte divergindo na estação sazonal do outono.

Quanto ao efeito da temperatura máxima na precipitação média do mês representativo de novembro, observa-se que pode atingir até 38°C demonstrando um acréscimo de ~2°C de probabilidade através das forçantes para 2040-2060 e tendência de diminuição da precipitação de ~5mm. Para o efeito da temperatura mínima na precipitação média do mês de novembro observa-se tendência de elevar a temperatura ~2°C em novembro de 22,5°C até 25°C através da probabilidade dos dados estimados pelas forçantes e tendência de diminuição da precipitação de ~5mm.

Os resultados de aumento de temperatura e redução de precipitação no Estado da Paraíba estão em consonância com as projeções regionais. Dantas *et al.* (2022), ao analisarem o Nordeste do Brasil sob o CMIP6, identificaram um robusto sinal de aquecimento e uma tendência de diminuição pluviométrica em todos os cenários, confirmando o padrão de vulnerabilidade macrorregional.

Salviano *et al.* (2016), observaram que a maior parte do Brasil apresenta tendências positivas para temperatura média ao longo do ano inteiro, e que a região norte do Bioma Caatinga, não apresentou tendência positiva em alguns meses do ano. De acordo com Fan *et al.* (2020), os modelos do CMIP6 tendem a subestimar as temperaturas de maio a agosto para o Brasil.

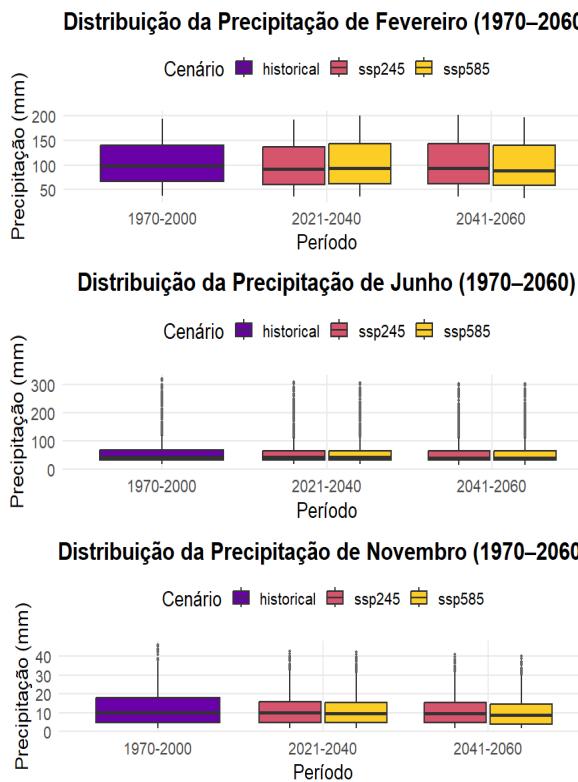
De acordo com *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007), os cenários de mudanças climáticas apontam para um aumento acima de 2°C na temperatura média global. Resultado similar identificado por este trabalho quando comparado o efeito do aumento da temperatura na precipitação do Estado da Paraíba.

Galvani *et al.* (2000) afirmam que, as temperaturas máximas e mínimas, que ocorrem em uma determinada região, estão associadas a outras variáveis meteorológicas, como disponibilidade de energia solar, nebulosidade, umidade do ar e do solo, vento e parâmetros geográficos como topografia, altitude e latitude do local, além da cobertura e tipo de solo. Portanto, não podendo se afirmar que somente a temperatura influencia os resultados deste trabalho.

Através dos boxplots da Figura 6 representativos da distribuição da precipitação entre 1970 a 2060, observa-se que no mês de fevereiro no período entre 2021 a 2040, ocorre pequena probabilidade de declínio da precipitação seguido do período 2040 a 2060. Para o mês de junho não apresenta alteração concordando com os resultados da Figura 1. Para o mês de novembro apresenta pequena diminuição da precipitação na forçante SSP585.

Silva *et al.* (2017), avaliando as tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica em bacias hidrográficas do Estado de Pernambuco, concluíram que não se pode afirmar que as tendências observadas são consequências das mudanças climáticas globais.

Figura 6. Boxplots da distribuição da precipitação de fevereiro, julho e novembro por cenário



Francisco *et al.* (2025), avaliando as mudanças de temperatura e precipitação simuladas por modelos climáticos de alta resolução do CMIP6 para 3 cenários de emissões de parte da região continental brasileira, observaram uma tendência de resfriamento de 1,59°C e a projeção da temperatura máxima uma tendência de se manter em 30°C. Em relação a precipitação futura, observaram tendência de diminuição de 5mm com mínima variabilidade entre as forçantes quanto a distribuição anual da precipitação.

Conclusão

O uso do software estatístico RStudio® agilizou o processo de obtenção dos dados, análise e elaboração dos mapas com rapidez e precisão.

O modelo climático MIROC6 proporcionou bons resultados na simulação das tendências futuras da precipitação e temperatura em relação aos dados históricos da base CPMI6.

Constatou-se variabilidade espacial da precipitação com o uso dos cenários futuros para a quadra chuvosa.

Na relação do efeito da temperatura máxima houve tendência positiva de aumento até 2°C em alguns meses do ano devido a probabilidade de menor ocorrência de precipitação com o uso das forçantes.

Referências Bibliográficas

AORI. Atmosphere and Ocean Research Institute. Center for Climate System Research - National Institute for Environmental Studies (2025). **WCRP CMIP6: the MIROC team MIROC6 model output collection**. Centre for Environmental Data Analysis. 2025. Disponível em: <http://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/15c8e637a36e4349f433f92b56149a2>. Acesso em: novembro de 2025.

ARAÚJO, D.C.S.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SILVA, S.F.; FARIAS, V.E.M.; RODRIGUES, A.B. Analysis of climate change scenarios using CMIP6 models in Pernambuco, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v.59, e1868, 2024.

AVILA-DIAZ, A.; ABRAHÃO, G.; JUSTINO, F.; TORRES, F.; WILSON, A. Extreme climate indices in Brazil: evaluation of downscaled earth system models at high horizontal resolution. **Climate Dynamics**, v.54, p.5065-5088, 2020.

ARAÚJO, E.M.; SILVA, I.N.; OLIVEIRA, J.B.; CAVALCANTE JUNIOR, E.G.; ALMEIDA, B.M. Aplicação de seis distribuições de probabilidade a séries de temperatura máxima em Iguatu-CE. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, n.1, p.36-45, 2010.

ASTOLPHO, F.; CAMARGO, M.B.P.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; PALLONE FILHO, W.J.; BARDIN, L. Regionalização de riscos de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais para o estado de São Paulo com base em modelos probabilísticos e digitais de elevação. **Bragantia**, v.64, n.1, p.139-148, 2005.

ASSIS, J.P.; NETO, D.D.; MANFRON, P.A.; MARTIN, T.N.; SPAROVEK, G.; TIMM, L.C. Ajuste de séries históricas de temperatura e radiação solar global diária às funções densidade de probabilidade normal e log-normal, em Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.12, n.1, p.113-121, 2004.

BOSCO, R.B.; VALVERDE, M.C. Projeções climáticas de precipitação e temperatura na Região Metropolitana do Vale do Paraíba-SP simulados por modelos climáticos do CMIP6. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.15, n.3, p.1621-1638, 2022.

BOCK, L.; LAUER, A.; SCHLUND, M.; BARREIRO, M.; BELLOUIN, N.; JONES, C.; MEEHL, G.A.; PREDOI, V.; ROBERTS, M.J.; EYRING, V. Quantifying progress across different CMIP phases with the ESMValTool. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.125, n.21, e2019JD032321, 2020.

BALLABIO, C.; BORRELLI, P.; SPINONI, J.; MEUSBURGER, K.; MICHAELIDES, S.; BEGUERÍA, S.; KLIK, A.; PETAN, S.; JANEČEK, M.; OLSEN, P.; AALTO, J.; LAKATOS, M.; RYMSZEWCZ, A.; DUMITRESCU, A.; TADIĆ, M.P.; DIODATO, N.; KOSTALOVA, J.; ROUSSEVA, S.; BANASIK, K.; ALEWELL, C.; PANAGOS, P. Mapping monthly rainfall erosivity in Europe. **Science of the Total Environment**, v.579, p.1298-1315, 2017.

BLÁZQUEZ, J.; NUNEZ, M.N. Analysis of uncertainties in future climate projections for South America: comparison of WCRP-CMIP3 and WCRP-CMIP5 models. **Climate Dynamics**, v.41, n.3, p.1039-1056, 2013.

CORREA, W.S.C.; SOARES, W.R.; AYLAS, G.Y.R.; REIS JUNIOR, N.C.; MARENKO, J.A.; CHOU, S.C.; NOBRE, C. Avaliação das simulações de temperatura e precipitação de um subconjunto de modelos do CMIP6 para o Brasil. **Derbyana**, v.43, e774, 2022.

CUNHA, A.P.M.A.; TOMASELLA, J.; RIBEIRO NETO, G.G.; BROWN, M.; GARCIA; S.R.; BRITO, S.B.; CARVALHO, M.A. Changes in the spatial-temporal patterns of droughts in the Brazilian Northeast. **Atmospheric Science Letters**, v.19, n.10, p.1-8, 2018.

CATALUNHA, M.J.; SEDIYAMA, G.C.; LEAL, B.G.; SOARES, C.P.B.; RIBEIRO, A. Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.10, p.153-162, 2002.

DANTAS, L.G.; SANTOS, C.A.; SANTOS, C.A.; MARTINS, E.S.; ALVES, L.M. Future changes in temperature and precipitation over northeastern Brazil by CMIP6 model. **Water**, v.14, n.24, e4118, 2022.

EYRING, V.; BONY, S.; MEEHL, G.A.; SENIOR, C.A.; STEVENS, B.; STOUFFER, R.J.; TAYLOR, K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v.9, p.1937-1958, 2016.

FRANCISCO, P.R.M.; SOUSA, J.H.S.; RIBEIRO, G.N.; SILVA, J.N. Projeção climática da pluviosidade e temperatura do ar da região continental brasileira entre 2021 a 2040 simulada por modelos do CMIP6-SSP126/245/370. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.25, n.1, p.27-42, 2025.

- FRANCISCO, P.R.M.; SOUSA, J.H.S.; RIBEIRO, G.N.; SILVA, J.N. Mapping of climate variables in the Northeast Region and the States of Minas Gerais, Maranhão and Amapá using WORDCLIM®2 spatial modeling. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v.14, n.1, p.895-910, 2024a.
- FRANCISCO, P.R.M.; SOUSA, J.H.S.; RIBEIRO, G.N.; SILVA, J.N.; RODRIGUES, R.C.M. Modeling by ordinary krigage in determining rainfall in Paraíba State between 2000 and 2022. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v.14, n.1, p.911-920, 2024b.
- FERREIRA, B.C.C.; VALVERDE, M.C. Análise dos índices de extremos de precipitação em cenários futuros na bacia do Rio Ribeira de Iguape - São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.37, n.1, p.41-55, 2022.
- FAN, X.; MIAO, C.; DUAN, Q.; SHEN, C.; WU, Y. The Performance of CMIP6 versus CMIP5 in simulating temperature extremes over the global land surface. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v.125, n.18, p.1-16, 2020.
- FICK, S.E.; HIJMANS, R.J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, v.37, n.12, p.4302-4315, 2017.
- FRANCISCO, P.R.M.; MEDEIROS, R.M.; BANDEIRA, M.M.; SILVA, L.L.; SANTOS, D. Oscilação pluviométrica anual e mensal no Estado da Paraíba-Brasil. *Revista de Geografia (Recife)*, v.33, n.3, p.141-154, 2016.
- FRANCISCO, P.R.M.; MEDEIROS, R.M.; SANTOS, D.; MATOS, R.M. Classificação climática de Köppen e Thornthwaite para o Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.8, n.4, p.1006-1016, 2015.
- FRANCISCO, P.R.M. **Classificação e mapeamento das terras para mecanização do Estado da Paraíba utilizando sistemas de informações geográficas.** 122f. Dissertação (Manejo de Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2010.
- GILLETT, N.P.; KIRCHMEIER-YOUNG, M.; RIBES, A.; SHIOGAMA, H.; HEGERL, G.; KNUTTI, R.; GASTINEAU, G.; JOHN, J.G.; LI, L.; NAZARENKO, L.; ROSENBLUM, N.; SELAND, Ø.; WU, T.; YUKIMOTO, S.; ZIEHN, T. Constraining human contributions to observed warming since the pre-industrial period. *Nature Climate Change*, v.11, p.207-212, 2021.
- GUSAIN, A.; GHOSH, S.; KARMAKAR, S. Added value of CMIP6 over CMIP5 models in simulating Indian summer monsoon rainfall. *Atmospheric Research*, v.232, e104680, 2020.
- GALVANI, E.; KLOSOWSKI, E.S.; ESCOBEDO, J.F.; CUNHA, A.R. Modelo da estimativa de temperatura mínima do ar para a região de Maringá/PR. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.8, n.1, p.105-110, 2000.
- HAWKINS, E.; SUTTON, R.T. The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Clim. Dynamics*, v.37, p.407-418, 2011.
- HASTENRATH, S. Interannual and longer-term variability of upper air circulation in the Northeast Brazil-Tropical Atlantic sector. *Journal of Geophysical Research*, v.105, n.6, p.7327-7335, 2000.
- HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, v.103, p.77-92, 1977.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 10 de abril de 2022.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis Summary for Policymakers Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2021. In: ONU. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>. Acesso em: 12 de novembro de 2025.
- IMBACH, P.; MOLINA, L.; LOCATELLI, B.; ROUPSARD, O.; CIAIS, P.; CORRALES, L.; MAHÉ, G. Climatology-based regional modelling of potential vegetation and average annual long-term runoff for Mesoamerica. *Hydrology and Earth System Sciences*, v.14, n.10, p.1801-1817, 2010.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (Ed.) SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; Averyt, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER, H.L. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. 996p.
- JONES, C.; CARVALHO, L.M.V. Climate change in the South American monsoon system: present climate and CMIP5 projections. *Journal of Climate*, v.26, n.17, p.6660-6678, 2013.
- JUNQUEIRA JÚNIOR, J.A.; GOMES, N.M.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M. Precipitação provável para a região de Madre de Deus, Alto Rio Grande: modelos de probabilidades e valores característicos. *Ciência e Agrotecnologia*, v.31, n.3, p.842-850, 2007.
- LUO, N.; GUO, Y.; CHOU, J.; GAO, Z. Added value of CMIP6 models over CMIP5 models in simulating the climatological precipitation extremes in China. *International Journal of Climatology*, v.42, n.2, p.1148-1164, 2022.
- LEHNER, F.; DESER, C.; MAHER, N.; MAROTZKE, J.; FISCHER, E.M.; BRUNNER, L.; KNUTTI, R.; HAWKINS, E. Partitioning climate projection uncertainty with multiple large ensembles and CMIP5/6. *Earth System Dynamics*, v.11, p.491-508, 2020.
- LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S.C.; SUEIRO, G.; DERECZYNSKI, C.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the nonhydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theoretical and Applied Climatology*, v.132, n.1-2, p.683-683, 2017.
- LUGATO, E.; PAUSTIAN, K.; PANAGOS, P.; JONES, A.; BORRELLI, P. Quantifying the erosion effect on current carbon budget of European agricultural soils at high spatial resolution. *Global Change Biology*, v.22, n.5, p.1976-1984, 2016.
- LYRA, G.B.; GARCIA, B.I.L.; PIEDADE, S.M.S.; SEDIYAMA, G.C.; SENTELHAS, P.C. Regiões homogêneas e funções de distribuição de probabilidade da precipitação pluvial no Estado de Táchira, Venezuela. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, n.2, p.205-215, 2006.
- MELO, M.H.B.; GOMES, H.B.; SILVA, M.T.; CABRAL, S.L. Análise da variação térmica e índice pluviométrico em bacias hidrográficas no Semiárido Brasileiro de acordo com projeções do CMIP6. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.18, n.1, p.001-018, 2025.
- MARENGO, J.A.; CUNHA, A.P.M.A.; NOBRE, C.A.; RIBEIRO NETO, G.G.; MAGALHAES, A.R.; TORRES, R.R.; SAMPAIO, G.; ALEXANDRE, F.; ALVES, L.M.; CUARTAS, L.A.; DEUSDARÁ, K.R.L.; ÁLVALA, R.C.S. Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4°C. *Natural Hazards*, v.103, n.2, p.2589-2611, 2020.
- MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES, L.M. Drought in northeast Brazil-past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, v.129, n.3-4, p.1189-1200, 2017.
- MORENO, A.; HASENAUER, H. Spatial downscaling of European climate data. *International Journal of Climatology*, v.36, n.3, p.444-458, 2016.
- MARENGO, J.A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. *Climatic Change*, v.129, n.1-2, p.103-115, 2015.
- MARENGO, J.A.; CHOU, S.C.; KAY, G.; ALVES, L.M.; PESQUERO, J.F.; SOARES, W.R.; SANTOS, D.C.; LYRA, A.A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.J.; GOMES, J.L.; BUSTAMANTE, J.F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta Cptec/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, v.38, p.1829-1848, 2012.
- MARTIN, T.N.; STORCK, L.; DOURADO NETO, D. Simulação estocástica da radiação fotossinteticamente ativa e da temperatura do ar por diferentes métodos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, n.9, p.1211-1219, 2007.
- MEEHL, G.A.; COVEY, C.; DELWORTH, T.; LATIF, M.; MCAVANEY, B.; MITCHELL, J.F.; STOUFFER, R.J.; TAYLOR, K.E. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.88, n.9, p.1383-1394, 2007.

NATIVIDADE, U.A.; GARCIA, S.R.; TORRES, R.R. Tendência dos índices de extremos climáticos observados e projetados no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.32, n.4, p.600-614, 2017.

PANAGOS, P.; BALLABIO, C.; MEUSBURGER, K.; SPINON, J.; ALEWELL, C.; BORRELLI, P. Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on {REDES} and WorldClim datasets. **Journal of Hydrology**, v.548, p.251-262, 2017.

RIAHI, K.; VAN VUREN, D.P.; KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; O'NEIL, B.C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K.; DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ, W.; POPP, A.; CUARESMA, J.C.; KC, S.; LEIMBACH, M.; JIANG, L.; KRAM, T.; RAO, S.; EMMERLING, J.; EBI, K.; HASEGAWA, T.; HAVLIK, P.; HUMPENODER, F.; SILVA, L.A.; SMITH, S.; STEHFEST, E.; BOSETTI, V.; EOM, J.; GERNAAAT, D.; MASUI, T.; ROGELJ, J.; STREFLER, J.; DROUET, L.; KREY, V.; LUDERER, G.; HARMSEN, M.; TAKAHASHI, K.; BOUMSTARK, L.; DOUELMAN, J.C.; KAINUMA, M.; KLIMONT, Z.; MARANGONI, G.; LOTZE-CAMPEN, H.; OBERSTEINER, M.; TABEAU, A.; TAVONI, M. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. **Global Environmental Change**, v.42, p.153-168, 2017.

RStudio. **Posit Software**. Disponível em: <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>.

SHABBIR, A.H. **Geo_Solution12/WorldClim_Climate data Automatic Downloading, Processing, and Visualizing Climate Data in R**. 2025. Disponível em: https://github.com/alihassan720/Geo_Solution12/blob/main/WorldClim_Climate%20data%20%20Automatic%20Downloading%2C%20Processing%2C%20and%20Visualizing%20Climate%20Data%20in%20R.txt.

SHIOGAMA, H.; TATEBE, H.; HAYASHI, M.; ABE, M.; ARAI, M.; KOYAMA, H.; IMADA, Y.; KOSAKA, Y.; OGURA, T.; WATANABE, M. MIROC6 Large Ensemble (MIROC6-LE): experimental design and initial analyses. **Earth System Dynamics**, v.14, n.6, p.1107-1124, 2023.

SOUZA, L.S.; MEDEIROS, E.S.; GALBETTI, M.V.; BICALHO, C.C.; SANTOS, C.A.C.; SHINMA, T.A.; SILVA, A.Q.; OLIVEIRA, L.A. Modelagem espacial de chuvas intensas no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.37, n.3, p.373-383, 2022.

SANTOS, D.J.; PEDRA, G.U.; SILVA, M.G.B.; GUIMARÃES JÚNIOR, C.A.; ALVES, L.M.; SAMPAIO, G.; MARENKO, J.A. Mudanças futuras de precipitação e temperatura no Brasil a partir dos níveis de aquecimento global de 1,5°C, 2°C e 4°C. **Sustainability in Debate**, v.11, n.3, p.74-90, 2020.

SRIVASTAVA, A.; GROTJAHN, R.; ULLRICH, P.A. Evaluation of historical CMIP6 model simulations of extreme precipitation over contiguous US regions. **Weather and Climate Extremes**, v.29, e100268, 2020.

SHIOGAMA, H.; ABE, M.; TATEBE, H. MIROC MIROC6 model output prepared for CMIP6 Scenario MIP. Version 2025. **Earth System Grid Federation**, 2019.

SILVA, R.O.B.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SOUZA, W. M. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.22, n.3, p.579-589, 2017.

SALVIANO, M.F.; GROPPPO, J.D.; PELLEGRINO, G.Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.31, n.1, p.64-73, 2016.

SHIOGAMA, H.; IMADA, Y.; MORI, M.; MIZUTA, R.; STONE, D.; YOSHIDA, K.; ARAKAWA, O.; IKEDA, M.; TAKAHASHI, C.; ARAI, M.; ISHII, M.; WATANABE, M. M.; KIMOTO, M. Attributing historical changes in probabilities of record-breaking daily temperature and precipitation extreme events. **SOLA**, v.12, p.225-231, 2016.

SANTOS, C.A.C.; BRITO, J.I.B.; RAO, T.V.R.; MENEZES, H.E.A. Tendências dos índices de precipitação no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.1, p.39-47, 2009.

TAYLOR, K.E.; STOUFFER, R.J.; MEEHL, G.A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.93, n.4, p.485-498, 2012.

UKKOLA, A.M.; KAUWE, M.G.; RODERICK, M.L.; ABRAMOWITZ, G.; PITMAN, A.J. Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation. **Geophysical Research Letters**, v.47, n.11, e2020GL087820, 2020.

VAREJÃO-SILVA, M.A.; BRAGA, C.C.; AGUIAR, M.J.N.; NIETZCHE, M.H.; SILVA, B.B. **Atlas Climatológico do Estado da Paraíba**. UFPB, Campina Grande, 1984.

WATANABE, M.; DUFRESNE, J.L.; KOSAKA, Y.; MAURITSEN, T.; TATEBE, H. Enhanced warming constrained by past trends in equatorial Pacific sea surface temperature gradient. **Nature Climate Change**, v.11, p.33-37, 2021.

WATANABE, M.; SHIOGAMA, H.; TATEBE, H.; HAYASHI, M.; ISHII, M.; KIMOTO, M. Contribution of natural decadal variability to global-warming acceleration and hiatus. **Nature Climate Change**, v.4, p.893-897, 2014.

YIGINI, Y.; PANAGOS, P. Assessment of soil organic carbon stocks under future climate and land cover changes in Europe. **Science of The Total Environment**, v.557-558, p.838-850, 2016.

ZHU, H.; JIANG, Z.; LI, J.; LI, W.; SUN, C.; LI, L. Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China? **Advances in Atmospheric Sciences**, v.37, p.1119-1132, 2020.