



CLAUDIANA MESQUITA DE ALVARENGA

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O
COMPORTAMENTO DAS SECAS EM UMA BACIA
HIDROGÁFICA TROPICAL ALTAMENTE ANTROPIZADA**

LAVRAS – MG

2026

CLAUDIANA MESQUITA DE ALVARENGA

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O COMPORTAMENTO DAS
SECAS EM UMA BACIA HIDROGÁFICA TROPICAL ALTAMENTE
ANTROPIZADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Hidrologia, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora
Prof.^a DSc. Lívia Alves Alvarenga

Coorientador
Prof. DSc. Javier Tomasella

**LAVRAS – MG
2026**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Alvarenga, Claudiana Mesquita de.

Impactos das mudanças climáticas sobre o comportamento das secas em uma bacia
hidrográfica tropical altamente antropizada / Claudiana Mesquita de Alvarenga. - 2026.
68 p.

Orientadora: Lívia Alves Alvarenga

Coorientador: Javier Tomasella

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. Mudanças climáticas. 2. Vazão de referência. 3. Bacia Hidrográfica do Rio
Paraopeba. 4. Eventos extremos. 5. Índice de secas. I. Alves Alvarenga, Lívia. II.
Tomasella, Javier. III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

CLAUDIANA MESQUITA DE ALVARENGA

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O COMPORTAMENTO DAS
SECAS EM UMA BACIA HIDROGÁFICA TROPICAL ALTAMENTE
ANTROPIZADA**

**IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON DROUGHT PATTERNS IN A HIGHLY
ANTHROPOGENIC TROPICAL RIVER BASIN**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Hidrologia, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 05 de fevereiro de 2026.

Dr^a. Livia Alves Alvarenga (Presidente) – Universidade Federal de Lavras

Dr. Carlos Rogério de Mello (Membro interno) – Universidade Federal de Lavras

Dr. Javier Tomasella (Membro Externo) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Dr^a. Minella Alves Martins (Membro Externo) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Documento assinado digitalmente
 **LIVIA ALVES ALVARENGA**
Data: 08/06/2026 14:23:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientadora
Prof.^a DSc. Livia Alves Alvarenga

Coorientador
Prof. DSc. Javier Tomasella

**LAVRAS – MG
2026**

*À minha família,
Dedico*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a meus pais, Camilo e Ana Lúcia, por todo apoio, incentivo e dedicação ao longo desses anos de graduação e pós-graduação. Vocês foram e sempre serão minha maior razão para continuar.

À minha irmã, Ana Cláudia, que é a minha inspiração desde criança, e meu sobrinho, Murilo, por todas as vezes que me chama de “madinha”. Nunca cresça, por favor.

Aos meus anjinhos de quatro patas Titiu, Caramelo, Pitico e Batuque.

Ao Guilherme Machado, pelo amor, palavras de apoio e carinho.

À Pâmela Melo, por todo apoio e ajuda durante o desenvolvimento da pesquisa. Desde os *meets*, aos encontros presenciais. Obrigada, de coração.

Agradeço à TPF Engenharia, em especial Fernando Resende, Ana Maiolino, Hugo Montenegro e Vinícius Barros, por terem me dado a oportunidade de me apaixonar, ainda no estágio, pela área de recursos hídricos. Aos meus antigos colegas de trabalho Marina Moura, Maria Júlia Pedroso, João Fontanella, Willyanne Oliveira, Riadny Ferreira e Camila Salgueiro,

Aos meus colegas de departamento, em especial, Pâmela Rafanelle, Milena Cristina, Pablo Machado, Patrick Machado e Samuel Timano. E por último, mas não menos importante, agradeço à Laura Pedrozo, por ter sido minha duplinha nessa etapa. Obrigada por ter tornado o caminho da pós-graduação mais leve.

Agradeço meus grandes amigos Manuh, Vinícius Santos e Mariana Gonçalves. E à Gabriella Coelho, por ser não só minha amiga, como minha família em Lavras.

Agradeço imensamente aos meus orientadores Livia Alvarenga e Javier Tomasella, por todo apoio e ajuda durante esse trabalho. Muito obrigada pela assistência ao longo desses meses.

Ao apoio da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (TED ANA/UFLA nº 011/2020), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) (Processos 305295/2021–7 e APQ–00709-21). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*“The scary news is: you're on your own now.
But the cool news is: you're on your own now!”
(Taylor Swift)”*

RESUMO

As mudanças climáticas têm provocado alterações significativas nas respostas hidrológicas, devido ao aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos. A Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, importante afluente do rio São Francisco, enfrentou entre 2013 e 2015 uma das secas mais severas dos últimos 70 anos. Diante da importância socioeconômica e ambiental da bacia, este estudo teve como objetivo avaliar as respostas hidrológicas da bacia frente às mudanças climáticas, utilizando-se dos Modelos Climáticos Globais ACCESS-ESM1-5, TaiESM1, CMCC-ESM2, MPI-ESM1-2-LR-1, NorESM2-MM, MRI-ESM2-0 e CanESM5, a partir de duas análises: verificação dos padrões de seca, caracterizados pelos índices SPI e SPEI; ii) análise da curva permanência, vazões de referência utilizando o Modelo Hidrológico Distribuído do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (MHD-INPE). O período *baseline* compreendeu os anos de 1992–2014. Foram utilizados dois cenários de forçamento radiativos (SSP245 e SSP585), distribuídos para o período futuro de 2040-2100: 2040. Os resultados dos índices de seca indicaram tendência de intensificação e prolongamento dos períodos secos, especialmente sob o cenário SSP585. Já as simulações de vazão apresentaram reduções consistentes nas vazões mínimas e aumento das vazões máximas.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, vazão de referência, Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, eventos extremos, índice de secas.

ABSTRACT

Climate change has caused significant changes in hydrological responses due to the increased frequency and intensity of extreme events. Between 2013 and 2015, the Paraopeba River Basin, an important tributary of the São Francisco River, faced one of the most severe droughts in the last 70 years. Given the socioeconomic and environmental importance of the basin, this study aimed to evaluate the hydrological responses of the basin to climate change, using the Global Climate Models ACCESS-ESM1-5, TaiESM1, CMCC-ESM2, MPI-ESM1-2-LR-1, NorESM2-MM, MRI-ESM2-0 and CanESM5, based on two analyses: verification of drought patterns, characterised by the SPI and SPEI indices; ii) analysis of the permanence curve, reference flows using the Distributed Hydrological Model of the National Institute for Space Research (MHD-INPE). The baseline period covered the years 1992–2014. Two socioeconomic forcing scenarios (SSP245 and SSP585) were used, distributed for the future period 2040-2100: 2040. The results of the drought indices indicated a trend towards intensification and prolongation of dry periods, especially under the SSP585 scenario. The flow simulations showed consistent reductions in minimum flows and increases in maximum flows.

Keywords: Climate change, reference flow, Paraopeba River Basin, extreme events, drought index.

INDICADORES DE IMPACTO

Visto que as ações antrópicas têm influência inequívoca na intensificação das mudanças climáticas, visto que há aumento da concentração de gases do efeito estufa que geram, por consequência, aumento da temperatura da superfície global, esse trabalho tem como objetivo entender as respostas hidrológicas frente às alterações no clima. A área de estudo é a bacia hidrográfica do rio Paraopeba, no estado de Minas Gerais, responsável pelo atendimento de diferentes usos de água, tais como irrigação, abastecimento urbano, industrial, dessedentação de animais, exploração mineral, dentre outros. É importante ressaltar que a bacia também é responsável pelo abastecimento de 53% da população na região metropolitana de Belo Horizonte. Visto que a bacia detém um grande papel socioeconômico e ambiental no estado, essa pesquisa visou compreender comportamento hidrológico, considerando o clima futuro em relação ao clima presente, com a utilização de Modelos Climáticos Globais. Para isso, a pesquisa se divide em dois grandes eixos: i) verificação dos índices de secas (SPI e SPEI); ii) análise do deflúvio pelo MHD-INPE e interpretação das vazões de manutenção, passíveis de conflito. Diante disso, os resultados permitirão auxiliar as políticas públicas locais nas estratégias de mitigação e adaptação, frente às mudanças climáticas, de forma a preservar o acesso à água e seus respectivos usos na bacia.

IMPACT INDICATORS

Given that anthropogenic actions have an unequivocal influence on the intensification of climate change, due to the increase in global surface temperature, this study aims to understand the hydrological responses to climate change. The area studied is the Paraopeba River basin in the state of Minas Gerais, which is responsible for supplying water for a variety of uses, such as irrigation, urban and industrial supply, animal watering, and mineral exploration, among others. It is important to highlight that the basin is also responsible for supplying 53% of the population in the metropolitan region of Belo Horizonte. Since the basin holds a significant socioeconomic and environmental role in the state, this research aimed to understand hydrological behavior, considering the future climate in relation to the present climate, using Global Climate Models. To achieve the objective, the research is divided into two main areas: i) verification of drought indices (SPI and SPEI); ii) analysis of runoff by MHD-INPE and interpretation of maintenance flows, which are subject to conflict. The results will help local public policies in mitigation and adaptation strategies in the face of climate change, to preserve access to water and its respective uses in the basin.

LISTA DE SIGLAS

AR6	Sexto Relatório de Avaliação
BCSD	Bias-Correction Spatial Disaggregation
BHRP/PRB	Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba
CORR	Correlação
DHSVM	Distributed Hydrology Soil Vegetation Model
GEE	Gases de Efeito Estufa
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project Phase
HAND	Height Above the Nearest Drainage
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
MCG	Modelos Climáticos Globais
MCR	Modelos Climáticos Regionais
NEX-GGDP-CMIP6 NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections	
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PIB	Produto Interno Bruto
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
SPI	Standardized Precipitation Index
SPEI	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
SWAT	Soil & Water Assessment Tool
UFLA	Universidade Federal de Lavras
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima
WCRP	World Climate Research Programme
WMO	World Meteorological Organization

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	14
1 INTRODUÇÃO GERAL	14
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO	16
2.1 Modelagem Hidrológica	16
2.2 Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)	18
2.3 Modelos Climáticos	19
2.4 Coupled Model Intercomparison Project – Sixth Fase (CMIP6).....	20
2.5 Modelagem Hidrológica utilizando o Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE)	22
2.6 Mudanças climáticas e o ciclo hidrológico	24
SEGUNDA PARTE	28
ARTIGO 1: Meteorological droughts in the Paraopeba River Basin current scenarios and future projections	28
ARTIGO 2: Impacts of Climate Change on the Hydrology of a Highly Disturbed Tropical River Basin	43
TERCEIRA PARTE	61
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIAS	62

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) afirma que as ações antrópicas, sobretudo associadas à intensificação do uso de combustíveis fósseis e às alterações no uso e cobertura da terra, exercem influência inequívoca no aumento da temperatura da superfície global (IPCC, 2023, Medeiros et al., 2022). Conforme pontuado pelo IPCC, entre os anos de 2011 e 2020, a temperatura na superfície da terra foi 1,1°C maior do que no período pré-industrial, de 1850 a 1900.

As mudanças climáticas têm sido associadas ao aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos, como secas prolongadas, ondas de calor e chuvas intensas, episódios os quais impactam diretamente o ciclo hidrológico e a disponibilidade hídrica (Zákhia et al., 2021, Alvarenga et al., 2025; Moura et al., 2025). Como consequência das alterações no clima verifica-se a intensificação da competição entre os múltiplos usos da água, ampliando as vulnerabilidades socioeconômicas (Siqueira et al., 2021).

As consequências das mudanças climáticas na bacia já são notórias. Entre 2013 e 2015, o estado de Minas Gerais enfrentou a pior seca dos últimos 70 anos, que teve um impacto significativo na bacia do rio Paraopeba (Santos e Silva, 2015). Durante o período de escassez, registrou-se um declínio nos níveis de armazenamento do sistema Paraopeba, atingindo 28,7%, 20,4% e 5,2% da capacidade total dos reservatórios de Rio Manso, Serra Azul e Vargem das Flores, respectivamente (Pinto, 2024).

Nesse contexto, a bacia do rio Paraopeba (BHRP) se destaca por diversas atividades econômicas, tais como centros industriais, minerários, hidrelétricas e grandes centros urbanos de relevância econômica e cultural (Barros da Silva et al., 2015; CBHSF, 2017; Durães e Mello, 2013; Soares et al., 2022, Alvarenga et al., 2025). Além disso, a bacia abrange uma totalidade de 48 municípios e é responsável pelo abastecimento de 53% da população residente na região (Aguilar e Coutinho de Paula; 2020, Honorato et al., 2025, França et al., 2025).

Como ferramenta para gestão dos recursos hídricos e a possibilidade de se obter projeções futuras, os modelos hidrológicos vêm sendo cada vez mais utilizados para o melhor entendimento das respostas hidrológicas associadas às mudanças climáticas e à alteração do uso e cobertura do solo (Alvarenga et al., 2020, Alvarenga et al. 2025). Dentre os diversos modelos hidrológicos existentes, o Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (Rodriguez e Tomasella, 2016) se destaca por

permitir a integração dos modelos atmosféricos em estudos de mudanças ambientais. Além disso, o modelo vem sendo empregado de forma satisfatória em bacias variando entre 5 e 1,4 milhões de km² (Oliveira et al., 2023; Tomasella et al., 2022).

Dentre as aplicações do MHD-INPE, destaca-se o estudo de Pinto (2024), onde foi avaliada a segurança hídrica, com base em seis diferentes cenários, as mudanças no uso e cobertura do solo e o consumo de água na bacia. A partir dos resultados obtidos, a autora observou possíveis impactos na geração de energia elétrica na Usina Hidrelétrica (UHE) Retiro Baixo, integrante da bacia do Paraopeba.

Zákhia et al. (2021) avaliaram os efeitos das alterações climáticas na bacia do Ribeirão Jaguara. A modelagem utilizou de três modelos climáticos globais (HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2) e os cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos do CMIP5. Os resultados indicaram para todos os cenários a redução da precipitação e da vazão sazonal, além do aumento da temperatura ao longo do século.

Dias e Rodriguez (2025) avaliaram os efeitos das mudanças climáticas na alta bacia do rio São Francisco (cabeceira da bacia até a UHE de Três Marias) utilizando o MHD-INPE. Os autores utilizaram os dados climáticos diários do modelo EC-EARTH sob o cenário RCP 8.5, considerando o período de 1981-2010 para caracterização do período *baseline* e 2011-2100 para as projeções futuras. Os resultados indicaram forte tendência de redução das vazões nas sub-bacias analisadas, com reduções médias chegando a 36,4% no exutório da bacia do rio Paraopeba.

Com base nas projeções do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6, traduzido como Comparação entre Modelos Acoplados), o estudo elaborado Siqueira et al. (2021) avaliou os efeitos das mudanças climáticas em bacias do Cerrado brasileiro, dentre elas a bacia do rio Paraopeba. A partir do modelo SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*), os autores utilizaram sete modelos climáticos globais e dois cenários do CMIP6 (SSP245 e SSP585). Os resultados indicaram redução na vazão média mensal e as condições de escassez são acentuadas no futuro médio.

Em função da relevância econômica, social e ambiental da bacia, torna-se importante a compreensão dos efeitos das mudanças climáticas no futuro próximo, intermediário e final do século, de forma a se avaliar o impacto das mudanças do clima na hidrologia na região. Assim, será possível contribuir para a formação de políticas públicas adequadas para manutenção das atividades existentes, verificação de possíveis áreas de conflito que podem auxiliar à gestão dos recursos hídricos na bacia (Caldeira et al., 2018; Melo et al., 2024).

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Modelagem Hidrológica

A modelagem hidrológica é uma importante ferramenta na gestão dos recursos hídricos, pois permite representar, em escalas espaciais e temporais, os processos físicos do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica (Warren, 2013; Spruill et al., 2000). Os registros históricos indicam que a modelagem hidrológica teve início há mais de um século, com o desenvolvimento de equações para descrever processos hidrológicos, visando prever vazões máximas com base em eventos pluviométricos (Almeida e Serra, 2017). Um exemplo clássico é o Método Racional que, apesar de ter sua origem incerta, os primeiros registros ocorreram por volta de 1889 (Carvalho, 2020).

Com os avanços tecnológicos e a crescente necessidade de obtenção de séries hidrológicas longas e representativas, a partir da década de 1950, com o aumento da disponibilidade de dados hidrometeorológicos e maior difusão do uso de computadores, houve aceleração dos processos de obtenção e análise de dados, até então limitados aos métodos estocásticos (Tucci, 2005; Marinho Filho et al., 2012).

Desse modo, dado a vasta disponibilidade de modelos, torna-se necessário compreender as diferentes classificações dos modelos para identificar suas limitações. Portanto, a escolha de um modelo deve ser feita considerando a aplicação desejada, a disponibilidade de dados preliminares da área, o número de parâmetros necessários e o nível de detalhamento dos processos hidrológicos (Alvarenga, 2020).

Os modelos estocásticos são descritos por Marinho Filho et al. (2012) como aqueles em que uma das variáveis envolvidas possui comportamento aleatório, ou seja, segue uma abordagem de probabilidade de ocorrência (Caldeira et al., 2018). Em contrapartida, nos modelos determinísticos as variáveis estatísticas são desconsideradas, de modo que cada valor de entrada resulta em um único valor de saída (Moreira, 2005).

Os modelos empíricos, chamados também de “caixas-pretas”, não se baseiam em princípios físicos, mas sim em tendências extraídas de análises estatísticas, sendo simples e pouco robustos (Caldeira et al., 2018; Moreira, 2005). Os parâmetros de entrada e a caracterização da estrutura são feitos por séries temporais, sem que haja necessidade de conhecimento das bacias hidrográficas (Pinheiro e Naghettini, 2010). Por outro lado, os modelos conceituais baseiam-se na representação física para análise do comportamento do

sistema (Tucci, 2005) e os processos hidrológicos são representados por equações matemáticas simplificadas (Melo et al., 2022).

Quando verificados em relação à escala de tempo, os modelos hidrológicos podem ser classificados como discretos ou contínuos (Caldeira et al., 2018). Quando o modelo é discreto, a modelagem é feita apenas para alguns instantes do período a serem representado pelo modelo (Marinho Filho et al., 2012), ou seja, as entradas, processamento e saídas são definidos para um período isolado da série. Os modelos contínuos são aqueles que se caracterizam pelos fenômenos sucessivos no tempo (Santana, 2018) e apresentam maior detalhamento, uma vez que a simulação engloba com maior exatidão as fases do ciclo hidrológico (Marinho Filho et al., 2012).

A variabilidade espacial, no entanto, não é considerada nos modelos concentrados, de modo que as variáveis de entrada e saída são representativas para toda área de estudo (Santos, 2018). Dessa maneira, os componentes do ciclo hidrológico, tais como: precipitação, evaporação, infiltração e escoamento, são analisados em termos médios na bacia (Marinho Filho et al., 2012).

Por outro lado, nos modelos distribuídos a variabilidade das características da bacia são consideradas relevantes para a simulação chuva-vazão, de forma que o espaço e o tempo são as principais variáveis (Carvalho, 2020). Para esses modelos, a bacia hidrográfica é dividida por sub-bacias ou células, e podem ser semidistribuídos e distribuídos, respectivamente (Viola, 2008). No entanto, um dos principais desafios desses modelos é simular as interações no meio entre geomorfologia, grupo hidrológico e vegetação em relação à infiltração e escoamento superficial (Alvarenga et al., 2017).

Nos modelos estacionários não ocorrem variação temporal e os parâmetros são constantes ao longo da simulação (Moreira, 2005), diferente dos modelos dinâmicos onde a variação temporal é considerada e, com isso, os parâmetros do modelo e as relações entre as variáveis podem ser modificadas ao longo do tempo, refletindo as mudanças nas condições hidrológicas.

Simular a resposta hidrológica de uma bacia é fundamental para melhoria da gestão dos recursos hídricos (Viola et al., 2009). Dentre as principais aplicações, destacam-se a previsão de cheias e inundações, gestão dos recursos hídricos, caracterização dos impactos das mudanças climáticas e de uso e cobertura do solo, dimensionamento de estruturas hidráulicas, análise de vazões de referência, entre outros (Caldeira, 2018).

2.2 Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) foi fundado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). O IPCC não tem caráter deliberativo e nem conduz estudos próprios. Portanto, sua principal função é sintetizar em seus *reports* as principais pesquisas científicas a nível global, que fornecem evidências robustas sobre as mudanças climáticas. Assim, permitem acesso à informação em escala mundial, permitindo que os diversos níveis de governos possam entender os avanços das mudanças no clima, de forma que se crie estratégias para mitigar, gerenciar e desenvolver políticas públicas relacionadas a essas alterações (Machado, 2024; Pollitt et al., 2024).

O primeiro Relatório de Análise (AR1) foi publicado pelo IPCC no ano de 1990 (Pollitt et al., 2024). Com base nas conclusões do AR1, era de conhecimento que as ações humanas influenciavam a emissão dos gases de efeito estufa, no entanto, não apresentava caráter de urgências em relação às mudanças climáticas, uma vez que se acreditava que o efeito estufa era uma ocorrência natural (Abud et al., 2023). O primeiro relatório serviu como base para a criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), *United Nations Framework Convention on Climate Change* (IPCC, s.d.). Além disso, foi criado com base nos cenários SA90s, que descreviam caminhos de alta emissão (SA90-A), crescimento lento, dado a eficiência energética (SA90-B) e dois cenários de mitigação (SA90-C e SA90-D) (Pedersen et al., 2022).

Em 1995, o Segundo Relatório Científico (AR2) ampliou os temas abordados pelo AR1, incluindo atualização dos SA90, denominados de IS92. Nesse relatório, foram estabelecidas as bases para o Protocolo de Kioto que ocorreu em 1997 (Marengo e Soares, 2007; Pedersen et al., 2022).

O terceiro Relatório de Avaliação (AR3), publicado em 2001, evidencia que a maior parte do aquecimento global observado nos últimos 50 anos é atribuído às atividades humanas e destaca a vulnerabilidade dos países em desenvolvimento e das comunidades de baixa renda frente às mudanças climáticas (Marengo e Soares, 2003).

Em 2007, o Quarto Relatório de Avaliação (AR4), destacou que as mudanças climáticas estavam sendo observadas em todos os continentes, com um aumento na temperatura global variando entre 2 °C e 4,5 °C acima dos níveis pré-industriais. O relatório delineou diferentes cenários de emissões, chamado de *Special Report on Emissions Scenarios* (traduzidos como Relatório Especial sobre Cenários de Emissões) e alertou os governos sobre o impacto global

no atraso na implementação de medidas para reduzir as emissões de gases poluentes e estabilizar os riscos climáticos (Marengo e Valverde, 2007; Záhkia, 2020).

O Quinto Relatório de Avaliação (AR5), publicado em 2014, aborda os efeitos das emissões de gases de efeito estufa em quatro novos cenários temporais de emissões, denominados de Representative Concentration Pathways (RCP) (traduzido como Caminhos Representativos de Concentração). Os RCPs (RCP26, RCP45, RCP60 e RCP85) são projeções climáticas que consideram o clima futuro, a forçante radiativa na atmosfera, emissão e concentração dos gases de efeito estufa (IPCC, 2014; Anjos et al., 2018; Záhkia, 2020).

O Sexto Relatório de Avaliação (AR6), publicação mais recente até o momento, contou com a aprovação de 234 autores e 195 governos e destaca que temperatura da superfície global é 1,1°C maior de 2011 a 2020 do que comparado com o período pré-industrial, de 1850 a 1900. Em linhas gerais, o documento elucida que a influência antropogênica nas mudanças climáticas é inequívoca, tornando-se um problema não somente para o futuro, como também para o clima presente. Inclusive, é previsto que até 2030 a temperatura aumentará cerca de 1,5°C (IPCC, 2022; Pereira de Sousa, 2024). Essa marca, no entanto, foi alcançada em 2024 (Copernicus, 2025).

O AR6 se baseia na sexta fase do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP6), traduzido como Projeto de Comparação entre Modelos Acoplados. Esse projeto visa compreender os efeitos das mudanças climáticas no clima passado, presente e futuro, analisando à variabilidade natural do clima frente às forçantes radioativas (Reis Junior et al., 2023).

2.3 Modelos Climáticos

Os modelos climáticos são ferramentas que fornecem uma representação matemática das condições atmosféricas, permitindo a previsão das condições meteorológicas para dias consecutivos, estações do ano e projeções do clima futuro para décadas e até séculos (Záhkia, 2020). Conforme destacado por Monteiro e Cabral (2025), os modelos climáticos possibilitam verificar a tendência do clima em determinado período, mas não de um dia específico. Portanto, a partir deles, torna-se também possível considerar os efeitos das alterações antropogênicas, tais como o aumento das emissões de gases de efeito estufa e alterações no uso e cobertura do solo (Sampaio et al., 2014).

Os modelos climáticos são subdivididos em Modelos Climáticos Globais (MCGs) e Modelos Climáticos Regionais (MCRs). Os MCGs são de suma importância para avaliar a variabilidade climática natural e as mudanças climáticas induzidas principalmente pela emissão

dos gases de efeito estufa (GEEs) (Reboita et al., 2024; Siqueira et al., 2021). Em relação à resolução espacial, os MCGs apresentam resolução horizontal de centenas de quilômetros (Záhkia, 2020).

Em contrapartida, os MCRs possuem uma resolução espacial menor, da ordem de dezenas de quilômetros, o que possibilita a melhor representação de precipitações intensas e estiagem, além de características do sistema, como topografia, vegetação, entre outros (Sales et al., 2015; Záhkia, 2020; Oliveira et al. 2023).

Dias e Reboita (2021) avaliaram o desempenho de 46 MCGs sobre a América do Sul tropical durante o período histórico (1996-2014). A partir dos modelos analisados, sete se mostraram satisfatórios para aplicação em pesquisas (E3SM-1-0, EC-Earth3, EC-Earth3-AerChem, EC-Earth3-Veg, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-LR e TaiESM1).

Reboita et al. (2024) avaliaram cinquenta MCGs do CMIP6 para cinco regiões da América do Sul durante o período de 1995-2014. Dentre as regiões analisadas, três são do Brasil: região Amazônica, Nordeste e Sudeste. A análise levou em consideração os resultados para temperatura e precipitação. De acordo com os autores, para a região do Sudeste, os modelos que se mostraram mais adequados para simular a precipitação foram ACCESS-CM2, ACCESS-ESM1-5 e EC-Earth3-Veg-LR e para a temperatura, os modelos CAMS-CSM1-0, CMCC-CM2-HR4 e GFDL-ESM4 foram os mais satisfatórios.

2.4 Coupled Model Intercomparison Project – Sixth Fase (CMIP6)

O *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP), projeto criado em 1995 pela *World Climate Research Programme* (WCRP), tem como propósito fornecer modelos climáticos de forma que permita ter uma melhor compreensão do clima passado, presente e futuro (Bazzanella et al., 2024, Moura et al., 2025).

Em comparação com outras gerações dos CMIPs, o CMIP6 destaca-se pelas melhorias na magnitude dos extremos de temperatura, em escala global, além de representar melhor os declínios na precipitação. E, ao contrário do CMIP5 que fornece somente os cenários de forçantes radioativas, a sexta fase considera a evolução socioeconômica atrelada ao Produto Interno Bruto (PIB) e a urbanização (O’neill et al., 2017; Reis Junior et al., 2023, Farias et al., 2024). É importante destacar, ainda, que os cenários climáticos do CMIP6 embasaram o AR6, publicação mais recente até o momento do IPCC

Medeiros (2022) avaliou as mudanças projetadas para o Brasil utilizando os modelos disponibilizados do CMIP3 ao CMIP6. Conforme constado pelo autor, nem sempre a evolução

do CMIP traz, de fato, melhorias nas representações do clima atual e projeções futuras e menores incertezas nos resultados para eventos extremos no Brasil. Contudo, o estudo constatou que para a região sudeste, onde se encontra a BHRP, o CMIP6 mostrou-se mais adequado para avaliar as respostas hidrológicas do que quando comparado às outras gerações do CMIP.

O CMIP6 apresenta os cenários *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs), traduzido como Caminhos Socioeconômicos Compartilhados. Os SSPs são compostos de cinco narrativas que correlacionam as tendências socioeconômicas, demográficas, tecnológicas, políticas e institucionais (O'Neill et al., 2017, Moura et al., 2025). Os SSPs são combinados aos RCPs, possibilitando a análise dos cenários futuros a partir de metas de forçantes radioativas projetadas até 2100 e variam de 2.6 a 8.5 Wm⁻² (watts por metro quadrado) em relação ao cenário prévio à revolução industrial (Tebaldi et al., 2021). Dessa forma, os SSPs distinguem entre si a partir do quanto sistema climático absorve de gases do efeito estufa a partir das mudanças sociopolíticas para alcance do forçamento (Soares e Correa, 2023, Neres et al., 2025).

As narrativas incluem desenvolvimento sustentável, desenvolvimento intermediário, rivalidade regional, desigualdade e desenvolvimento com combustíveis fósseis. Os cenários SSP119 e SSP126 referem-se às baixas emissões, relativo à perspectiva em que os governos seguem gradualmente e rigorosamente as metas climáticas. Verifica-se, portanto, redução das desigualdades sociais, cooperação entre países, investimento em políticas públicas e transição demográfica, aplicação de energias renováveis e limpas. Esse processo, gera, consequentemente, baixos desafios para adaptação e mitigação (O'Neill et al., 2017; Petrielli, 2024; Farias et al., 2024).

O cenário SSP245, correspondente às médias emissões, representa o “meio do caminho”, em que as tendências de melhoria não mudam acentualmente em relação aos padrões históricos. Nesse cenário, verifica-se que o consumo de combustíveis fósseis, embora verifique-se reduções, seu uso continua sendo presente. Em relação às desigualdades, os investimentos nas políticas não são suficientemente elevados e a desigualdade social entre países ainda é acentuada. Em função das tendências médias, o desafio mitigação e adaptação é moderado (O'Neill et al., 2017; Petrielli, 2024; Farias et al., 2024; Hanna et al., 2024).

O cenário SSP370 é caracterizado por uma rivalidade regional. Nesse cenário, verifica-se uma alta desigualdade, especialmente nos países não desenvolvidos, além da baixa prioridade entre os países nas questões relacionados à sustentabilidade. Desse modo, os desafios para mitigação e adaptação são altos (O'Neill et al., 2017).

Na narrativa SSP4, correspondente à desigualdade, observa-se que os investimentos em capital humano são desiguais, gerando disparidades econômicas e desigualdades globais. Nesse

sentido, verifica-se um abismo entre sociedades ricas e economias emergentes, que reflete na dificuldade dos países mais pobres em prover acesso à água, saneamento básico e saúde para a população mais carente. O poder se concentra em elites, marginalizando grupos vulneráveis, enquanto aumenta a instabilidade social. Investimentos em energia se diversificam, equilibrando combustíveis de alta emissão e alternativas de baixo carbono diante da incerteza dos mercados (O'Neill et al., 2017).

Por fim, o cenário SSP585 elucida uma sociedade impulsionada por uso de combustíveis fósseis, que gera, conseqüentemente, maiores desafios para mitigação (Petrielli, 2024; Farias et al., 2024). Nesse cenário, é muito provável que a temperatura da superfície global esteja de 3,3 a 5,7°C acima da temperatura atingida entre 1850 e 1900 (IPCC, 2022).

2.5 Modelagem Hidrológica utilizando o Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE)

O Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), é classificado como um modelo hidrológico determinístico e distribuído (Rodriguez e Tomasella 2016). O modelo representa os processos chuva-vazão a partir dos componentes do balanço hídrico e da propagação do escoamento na bacia e permite a integração de modelos atmosféricos em estudos de mudanças ambientais globais.

Alguns autores verificaram que a performance do MHD-INPE não era satisfatória em pequenas bacias (Amaral et al., 2017), contudo o trabalho de Melo et al. (2022) na bacia do Ribeirão Lavrinha (6,76 km²) e de Záhkia et al. (2021) na bacia do Ribeirão Jaguará (33 km²), corroboraram a possibilidade de aplicá-lo também para bacias de pequeno porte. Atualmente, o modelo vem sendo empregado em bacias variando entre 5 e 1,4 milhões de km² (Oliveira et al., 2023; Tomasella et al., 2022).

Originalmente, o MHD-INPE foi criado para analisar as respostas hidrológicas na Amazônia frente aos impactos das mudanças do uso e cobertura do solo. Contudo, atualmente vem sendo empregado em outras aplicações, tais como previsão de vazão de eventos extremos (Negrão et al., 2016; Costa et al., 2023; Falck et al., 2025), estimativa de umidade no solo (Dal'Agno et al., 2015), projeções de impactos causados pelas alterações no clima em bacias (Záhkia et al., 2021; Melo et al., 2022; Oliveira et al., 2023), segurança energética diante das mudanças climáticas (Paiva et al., 2024; Von Randow et al., 2019), mudança de uso e ocupação do solo (Pilotto et al., 2023; Oliveira et al., 2022; Rodriguez e Tomasella, 2016), previsões de desastres hidrológicos (Gonçalves et al., 2014); avaliação da segurança hídrica em relação ao uso e cobertura do solo e consumo de água (Pinto, 2024).

O MHD-INPE discretiza a bacia em grades regulares de modo que em cada célula são simulados os processos do ciclo hidrológico e o escoamento resultante é propagado por uma rede de drenagem. Seus módulos de resolução incluem: o balanço de água no solo, evaporação de superfície de água livre (zonas saturadas, interceptação e evapotranspiração), diferentes escoamentos (superficiais, subsuperficiais e subterrâneos) e o escoamento na rede de drenagem. O modelo permite a interação de modelos atmosféricos em estudos de mudanças ambientais globais (Rodriguez e Tomasella, 2016).

Conforme Tomasella et al. (2022), para a resolução da evapotranspiração e dos fluxos de água na célula, são utilizadas três camadas: superior/superficial, intermediária/transmissão e inferior/saturada. A camada superior, que responde rapidamente às demandas atmosféricas, corresponde à geração de escoamento superficial e subsuperficial, e drena para a camada intermediária, que por sua vez é responsável pela manutenção da evapotranspiração em épocas de estiagem, atuando como um reservatório para vegetação com raízes profundas, característico do bioma cerrado e florestas. Além disso, essa camada tem função de retardar a recarga subterrânea em ocorrências de chuva. Por fim, a camada inferior caracteriza-se pelo fluxo de base.

Os processos de obtenção do escoamento e a separação de fluxos no MHD-INPE são modelados por meio da integração de conceitos de distribuição probabilística da capacidade de armazenamento, como utilizados no modelo Xinanjiang (Ren-Jun, 1992; Zhao et al., 1995 apud Negrão et al., 2016), juntamente com os princípios adotados no TopModel (Beven; Kirkby, 1979 apud Negrão et al., 2016). As metodologias estabelecem uma correlação entre a resposta hidrológica da bacia e os padrões de auto-organização observados em grande escala (Sivapalan, 2005 apud Negrão et al., 2016).

De acordo com Tomasella et al. (2022), o MHD-INPE admite que o lençol freático é paralelo a superfície, de modo que não existe uma variação linear da transmissividade com relação à profundidade. Além disso, quando o armazenamento do solo é máximo, considera-se que o fluxo subterrâneo também é máximo.

Pinto (2024) utilizou o MHD-INPE para avaliar a segurança hídrica na Bacia do rio Paraopeba. Para tal, utilizou-se dois cenários referentes as mudanças no uso e cobertura, sendo: cenário atual (CA), a partir da consideração da evolução das alterações no uso e cobertura de 1985 a 2018 e, cenário C1, em que se adotou o mapa de 1985 e consumo de água para abastecimento público, com consumo per capita até 2018. Nesses cenários, observou-se que, em seis das sete sub-bacias, há aumento das vazões mínimas, da evapotranspiração e evaporação do dossel. Quanto aos cenários do consumo de água (C2, C3, C4 e C5), constatou-

se a diminuição das vazões mínimas, que traz impactos na geração de energia elétrica na Usina Hidrelétrica (UHE) Retiro Baixo.

Zákhia et al. (2021) avaliaram os efeitos das alterações climáticas na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguará a partir do MHD-INPE. No estudo, foram avaliados três modelos climáticos globais (HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2) e dois cenários do CMIP5, sendo estes RCP4.5 e RCP8.5. Os autores observaram que, em comparação com o clima presente, há uma redução na precipitação no modelo Eta-HadGEM2-ES (RCP8.5, 2071-2099) de 87,3%. Em contrapartida, para as projeções com uso do modelo Eta-MIROC5, verifica-se um aumento da precipitação mensal de 167,2% (RCP4.5, 2041-2070). Em todos os cenários, constatou-se um aumento na temperatura média até o final do século. No que diz respeito às precipitações sazonais, para o clima futuro, todas as estações apresentam redução, com exceção do inverno. Os autores concluem que caso as projeções se concretizem até o fim do século, há possibilidade de impactos na produtividade agrícola de pequenos agricultores residentes na bacia.

Melo et al. (2024) analisaram as incertezas nas estimadas de escoamento de longo termo, considerando cenários futuros, a partir da utilização dos modelos hidrológicos Budyko e MHD-INPE. As projeções climáticas foram obtidas a partir do MRC Eta-Model, com resolução de 20 km. Foram simulados os cenários RCPs 4.5 e 8.5, com utilização dos modelos MIROC5, HadGEM2-ES, CANESM2 e BESM. Em relação aos resultados observados, para as estimativas de longo prazo, as projeções futuras de escoamento superficial de longo termo foram superiores com utilização do método de Budyko quando comparado ao MHD-INPE em condição com maior precipitação e menor aridez. Quando comparado a maior aridez, observa-se um comportamento contrário.

2.6 Mudanças climáticas e o ciclo hidrológico

De acordo com Medeiros (2024), independente do CMIP utilizado, os cenários futuros indicam que o Brasil será altamente impactado pelas mudanças climáticas. A ocorrência desses eventos, tais como secas e chuvas extremas, contribui para o aumento do estresse hídrico e são acelerados pelas ações antrópicas (Brunett et al., 2021, Barbino et al., 2024). O bem-estar humano é intrinsicamente ligado à variabilidade climática (Zákhia, 2021). Assim, a ocorrência de eventos extremos pode gerar impactos sociais, ambientais e afetar a multiplicidade de usos da água em diversas regiões, interferindo na relação água-comida-energia (Ribeiro et al., 2023; Siqueira et al., 2021; Zákhia, 2021).

Desse modo, a análise das variáveis climáticas e das consequências das alterações no clima torna-se essencial não apenas para o entendimento do regime de temperatura e precipitação, mas também para avaliar impactos em outras esferas socioeconômicas e ambientais. Dentre elas, destacam-se (i) crises na agricultura, com perdas de safras e consequentes aumento dos preços dos alimentos; (ii) ameaça e alteração de ecossistemas, (iii) impactos na produção de energia elétrica; (iv) risco de inundações; (v) disseminação de doenças transmitidas por vetores e aumento da incidência de doenças de veiculação hídrica (Alvarenga et al., 2018; Abud et al., 2023; Barcellos et al., 2009, Bolson e Haonat, 2016).

Uma vez que a influência das ações antrópicas na intensificação dos eventos extremos é inequívoca, faz-se necessário estudar os riscos e impactos das alterações no clima de forma a promover estratégias de mitigação frente a esse problema. Em função disso, diversos cientistas estudam a relação do ciclo hidrológico em relação às mudanças climáticas (Guimarães et al., 2016; Medeiros et al., 2022). A seguir são apresentadas algumas alterações observadas na hidrologia utilizando diferentes metodologias.

Oliveira et al. (2017) avaliaram os efeitos das mudanças climáticas na geração de energia na Bacia do Alto Rio Grande, local onde se concentra os reservatórios da usina de Camargos, Itutinga e Funil. O modelo hidrológico foi simulado pelo SWAT a partir de dois modelos climáticos globais e dois cenários do AR5 (RCP4.5 e RCP8.5). Os resultados indicaram redução na vazão média mensal e no escoamento superficial. Segundo os autores, estima-se uma queda no potencial de geração de energia elétrica, frente aos cenários analisados, que varia de 6,1 % a 58,6 % ao longo do século.

Alvarenga et al. (2018) estudam os impactos das mudanças climáticas na vazão média sazonal e no balanço hídrico da Bacia Hidrográfica Lavrinha, afluente da bacia do Rio Grande. A avaliação foi feita através do *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM), com base nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 do Eta-HadGEM2-ES presentes do AR5 IPCC. O período de base (clima presente) compreendeu os anos de 1961 a 1990 e os cenários futuros foram divididos em três períodos, sendo: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099. Os resultados indicaram redução na vazão sazonal para todos os períodos analisados, bem como para os cenários RCPs. Em relação ao escoamento, para o verão, observou-se redução de -80,35 % e -74,24 %, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente.

Siqueira et al. (2021) avaliaram os efeitos da conservação de água e solo e o reflorestamento de áreas ripárias na bacia hidrográfica de Três Marias (que compreende os afluentes Alto São Francisco, Pará e Paraopeba), localizada no Cerrado brasileiro, no contexto das mudanças climáticas. O modelo hidrológico utilizado foi o SWAT, com calibração e

validação compreendendo os períodos de 1992-2005 e 2006-2012, respectivamente. A simulação contou com a utilização de sete modelos climáticos globais e dois cenários do CMIP6, sendo estes SSP245 e SSP585. Os resultados indicaram redução na vazão média mensal e condições de escassez acentuadas no futuro médio e distante. Os resultados indicaram que o atendimento as necessidades de subsistência humana podem ser comprometidas até o final do século, afetando a relação água-comida-energia.

Silva et al. (2021) estudaram os impactos das mudanças climáticas nos reservatórios do rio São Francisco, incluindo o reservatório de Retiro Baixo, que faz parte da BHRP. O estudo também quantificou o aumento das demandas por água, que impactam diretamente o desempenho desses reservatórios. Foram avaliados cinco modelos climáticos de circulação do CMIP6, dois cenários de projeções (SSP245 e o SSP585) e os *timeslices* 1971 a 2000, como *baseline*, e as projeções futuras de 2015 a 2050. Os resultados indicaram aumento da evapotranspiração e aumento da demanda do consumo humano, sendo obtido um índice de Confiabilidade menor que 60% e menor que 50% para o índice de Resiliência, que pode impactar o desempenho do reservatório de Retiro Baixo.

Os eventos de secas são fenômenos naturais, contudo, com o avanço das mudanças climáticas, a ocorrência desses episódios torna-se cada vez mais frequente (Alvarenga et al., 2025; Rotbee et al., 2025). Dentre as metodologias de quantificação das secas difundidas na literatura, destaca-se o SPI, que vem do inglês *Standardized Precipitation Index*, proposto por McKee (Lima et al., 2022; Bosco e Valverde, 2022). Esse índice, endossado pela *World Meteorological Organization* (WMO), utiliza somente a distribuição de precipitação nos seus cálculos, o que torna o processamento computacional menos complexo (Rezaiy e Shabri, 2024). O SPI vem sendo aplicado em diferentes áreas, tais como agricultura, abastecimento urbano, energético e econômico, de modo que se compreenda os efeitos da seca nesses usos (Sun et al., 2024).

No contexto das mudanças climáticas, os índices de seca, juntamente com os modelos climáticos globais, permitem caracterizar esses eventos para o futuro curto, médio e final do século. Contudo, avaliar esses eventos é um desafio, dado que sua ocorrência se dá em uma resolução menor do que apresentada por esses modelos (Oliveira et al., 2024).

Na bacia do Rio Verde, Conceição et al. (2024) avaliaram as secas meteorológica e hidrológicas a partir de projeções climáticas dos cenários RCP4.5 e RCP8. Foram empregados os índices SPI (*Standardized Precipitation Index*) e SPEI (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*) para o clima presente (1961-2005) e futuro (2005-2099). Para o clima futuro, verificou-se que em ambos os cenários, os resultados para o SPI foram

semelhantes. Quando considerado o SPEI, constatou-se que para o cenário RCP4.5, há tendência de extremos de seca nos anos 2083/2084 e 2098/2099 para os municípios de Lavras, Machado e São Lourenço.

Com a utilização do CMIP6, fase mais atualizada das gerações do CMIP, Ferreira et al. (2023) avaliaram as secas hidrológicas na América do Sul para o período futuro (2020-2099) considerando dois cenários de emissões, SSP245e SSP585. Para representação do clima futuro, foram selecionados oito modelos climáticos globais da sexta fase do CMIP, dentre eles CMCC-CM2-SR5, CMCC-ESM2, EC-Terra3, GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-LR e MRI-ESM2-0. Os resultados indicaram o aumento e duração dos eventos de seca, com maior severidade nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, principalmente no cenário SSP585.

Na Região Metropolitana do Vale do Paraíba, no estado de São Paulo, Bosco e Valverde (2022) também avaliaram os efeitos das mudanças climáticas no comportamento da precipitação para quatro sub-regiões. Para tal, adotou-se os cenários SSP245 e SSP585 e os modelos climáticos de circulação CNRM-CM6-1-HR, EC-EARTH3 e MPI-ESM1-HR, presente no CMIP6. Os resultados indicaram que para todas as sub-regiões, o número de anos classificados como secos sobrepõe-se aos classificados como úmidos.

A disponibilidade hídrica de uma bacia pode ser afetada pela intensificação da urbanização e aumento de demandas, gestão ineficiente pelos órgãos governamentais, atividades antrópicas e as mudanças climáticas (Tundisi, 2008). Entre 1990 e 2020, verificou-se perdas de água em quase todas as regiões hidrográficas no país (Figueiredo et al., 2024). É importante também destacar que a segurança hídrica envolve não apenas a quantidade de água, mas também a qualidade. Desse modo, os recursos hídricos devem atender os múltiplos usos (ao curto e longo prazo) e ser acessível (fisicamente e financeiramente) (Rosa et al., 2021; Figueiredo et al., 2024).

De acordo com o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), existem, atualmente, 57 áreas de conflito declaradas no estado de Minas Gerais (2019), estando a maioria concentrada na região noroeste do estado. Apesar de, atualmente, nenhuma dessas áreas estarem localizadas dentro da BHRP, estudos realizados na bacia mostram um desequilíbrio entre oferta e demanda de água. Além disso, até o final do século XXI, prevê-se aumento na proporção de pessoas vivendo sob condição de escassez hídrica (Espíndola e Ribeiro, 2023).

SEGUNDA PARTE

Artigo 1 - Redigido conforme norma do periódico científico - Versão publicada	
Título do artigo:	ARTIGO 1: Meteorological droughts in the Paraopeba River Basin current scenarios and future projections
Autores:	Claudiana Mesquita de Alvarenga Lívia Alves Alvarenga Pâmela Aparecida Melo Javier Tomasella Carlos Rogério de Mello Pâmela Rafanele França Pinto
Periódico:	Revista Land MDPI
ISSN	2073-445X
DOI	https://doi.org/10.3390/land14102093

Article

Meteorological Droughts in the Paraopeba River Basin: Current Scenarios and Future Projections

Claudiana Mesquita de Alvarenga ¹, Lívia Alves Alvarenga ¹, Pâmela Aparecida Melo ² , Javier Tomasella ³ ,
Pâmela Rafanele França Pinto ¹ and Carlos Rogério de Mello ^{1,*} 

¹ Departamento de Recursos Hídricos, Universidade Federal de Lavras, Lavras 37203-202, Brazil; claudina.alvarenga1@estudante.ufla.br (C.M.d.A.); livia.aalvarenga@ufla.br (L.A.A.); pâmela.pinto3@estudante.ufla.br (P.R.F.P.)

² Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), São José dos Campos 12247-016, Brazil; pâmela.melo@cemaden.gov.br

³ Centro de Ciência do Sistema Terrestre, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Cachoeira Paulista 12630-970, Brazil; javier.tomasella@inpe.br

* Correspondence: crmello@ufla.br

Abstract

Meteorological droughts have been occurring with greater frequency and intensity, impacting water security in various regions. Between 2013 and 2015, the Paraopeba River Basin in southeast Brazil experienced its most severe drought in the last 70 years, resulting in low levels in the Paraopeba system reservoirs, which supplies 53% of the Metropolitan Region of Belo Horizonte, the third largest metropolitan area in Brazil. This study evaluated the climate models' performance from the NEX-GDDP-CMIP6 through drought indices projections, specifically the Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). The results showed that seven climate models can represent the current climate in the basin. For the drought's projection, the indices were used in two time scales (six and twelve months) for both the current climate and two future scenarios (SSP245 and SSP585). Our results highlight the intensification of droughts throughout the twenty-first century, with greater intensification in the SSP585 scenario. The SPEI indicated trends towards drier conditions, particularly under the SSP585 scenario and on the twelve-month timescale. These findings demonstrate the relevance of climate change and drought indices on the projections, supporting public policies for mitigation and adaptation, especially in strategic regions for water supply and hydro-electric generation.

Keywords: future projections; drought events; water security; basin



Academic Editor: Hanoch Lavee

Received: 25 September 2025

Revised: 14 October 2025

Accepted: 17 October 2025

Published: 21 October 2025

Citation: de Alvarenga, C.M.; Alvarenga, L.A.; Melo, P.A.; Tomasella, J.; Pinto, P.R.F.; de Mello, C.R. Meteorological Droughts in the Paraopeba River Basin: Current Scenarios and Future Projections. *Land* **2025**, *14*, 2093. <https://doi.org/10.3390/land14102093>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Droughts are defined by a reduction in precipitation in relation to normal climatological patterns for a given region and period. While droughts are natural phenomena, they have been intensified by the effects of climate change [1,2]. This occurs because the increase in temperature at the earth's surface has caused significant changes in the hydrological cycle, resulting in an increased frequency and intensity of extreme weather events [3,4].

Between 2013 and 2015, the Minas Gerais state faced its worst drought in 70 years [5]. The Paraopeba River Basin, for example, showed reduced reservoir levels, reaching 28.7%, 20.4%, and 5.2% of the total capacity of the Rio Manso, Serra Azul, and Vargem das Flores reservoirs, respectively [6,7]. These reservoirs supply approximately 53% of the Metropolitan Region of Belo Horizonte, which is approximately three million people [8,9].

Identifying droughts is challenging due to the complexity involved in measuring their intensity, duration, and magnitude [10,11]. Droughts are commonly classified as meteorological, agronomic, hydrological, or socioeconomic, depending on their predominant impacts and temporal characteristics [12,13]. The accurate timing, identification, monitoring, and prediction of these events is essential for effective mitigation strategies and adaptation to resource scarcity [14,15].

Drought indices are widely used tools that aim to quantify the severity, duration, and extent of drought in different climate regimes [3,12,16,17]. The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) [18] and the Standardized Precipitation Index (SPI) [19] are examples of these tools that are widely applied in drought studies. The SPI is calculated by fitting a Probability Distribution Function (PDF) to a precipitation time-series. This enables the identification of dry and wet periods across various timescales [20]. Similarly, the SPEI incorporates both precipitation and evapotranspiration, as it calculates a water balance, which variation is also described by a PDF. This allows for the assessment of temperature impacts, providing a more robust index [11,21].

In the context of climate change, Global Climate Models (GCMs) serve as essential tools for representing the physical and chemical characteristics of the atmosphere, boosted by anthropogenic activities [22–24]. Because climate events are interconnected on a global scale, modeling the atmosphere remains challenging due to uncertainties related to climate variability and local topography [13,25]. Thus, the NASA-Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GGDP-CMIP6) climate model, developed from the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project, incorporates bias correction and spatial disaggregation to account for the impacts of local topography on the climate. This database is a valuable resource for projecting drought conditions, especially in strategic regions for water supply and hydroelectric energy generation, such as in the Paraopeba River Basin.

The objective of this study is to assess meteorological drought projection in the Paraopeba River Basin. To achieve this goal, the performance of CMIP6 models was assessed for the current scenario by comparing observations against model precipitation estimations. Then, drought projections were evaluated using the SPI and SPEI for the current climate, SSP245, and SSP585 emission scenarios at six- and twelve-month timescales and for the future period (2040 to 2100).

2. Materials and Methods

2.1. Study Area Description

The Paraopeba River Basin, a sub-basin within the São Francisco River Basin, encompasses an area of 12,500 km², situated between latitudes −44.92 and −43.68 and longitudes −20.93 and −18.71 (see Figure 1). The region features diverse topography, with elevations ranging from 571 m to 1614 m. The geological composition includes rocks from the Crystalline Complex, ferruginous formations of the Minas Group, and various sedimentary deposits, as well as fault systems that impact groundwater hydrology [7,8]. Average annual precipitation across the basin ranges from 1120.1 mm to 1550.7 mm.

The Paraopeba hydrological system is a key source of water supply for the Metropolitan Region of Belo Horizonte, which is the third largest in Brazil. The economic activities within the basin include mining, industrial operations such as steel, textile, food, automotive, and petrochemical manufacturing, urban centers, and hydroelectric plants, including Salto do Paraopeba (2.45 MW) and Retiro Baixo (82.0 MW). Consequently, intensified droughts in this region can result in considerable economic losses that affect irrigation, agricultural production, power generation, water supply, and navigation.

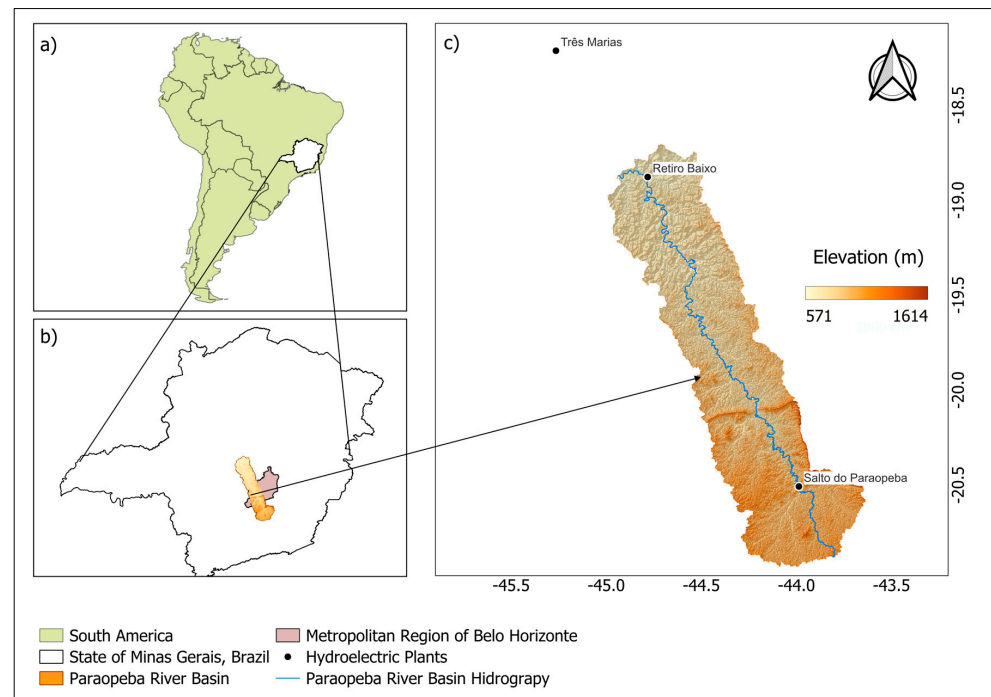


Figure 1. Geographical location of the Minas Gerais state in South America (a), Paraopeba River Basin location in the Minas Gerais state (b), and Paraopeba River Basin digital elevation model and hydropower plants (c).

2.2. Climate Change Projections Database

The climate change projections were obtained from the NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6), which provides high-resolution scenarios based on CMIP6 models [26]. This dataset uses bias correction, i.e., a spatial disaggregation method, and applies spatial disaggregation using the global meteorological forcing dataset, integrating local topography effects on precipitation [26–28].

Seventeen climate models from the NEX-GDDP-CMIP6 [29] were used in this study. These models supplied meteorological data for the control period, defined as the current climate from 1950 to 2014, during which greenhouse gas concentrations remain unchanged. Additionally, the models offer data for four of the five Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios—SSP126, SSP245, SSP370, and SSP585—for the years 2015 to 2100. Each scenario aligns projected radiative forcing by the end of the century with trends in socioeconomic, demographic, technological, political, and institutional factors [30,31].

This study examines two scenarios derived from CMIP6: SSP245, categorized as an intermediate pathway, and SSP585, representing the most pessimistic scenario. SSP245 reflects moderate efforts to reduce fossil fuel consumption; however, these reductions are insufficient, leading to its classification as a trend scenario. In contrast, SSP585 assumes persistent high dependence on fossil fuels, meaning that the global average surface temperature may increase between 3.3 °C and 5.7 °C above the pre-industrial period.

In addition, this study analyzed the future period from 2040 to 2100, subdivided into three time slices: 2040–2060 (near future), 2061–2080 (mid-future), and 2081–2100 (end of the century). This analysis extended to the SSP245 and SSP585 emissions scenarios using drought indices (SPI and SPEI).

2.3. Current Scenario

Seventeen climate models (NEX-GDDP-CMIP6) were assessed for the period from 1992 to 2014. The performance of the models with respect to observed precipitation was evaluated using statistical metrics. The Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD) [32]

serves as the observational dataset, incorporating data from 11473 rain gauges and 1252 weather stations, which were interpolated by inverse and angular distance weighting. These observed datasets were compared to precipitation outputs from climate models. For validation, drought indices calculated from climate models (NEX-GGDP-CMIP6) were compared with those obtained from BR-DWGD datasets using correlation coefficients (r).

2.4. Climate Model Performance

The performance of the climate models (NEX-GDDP-CMIP6) was carried out considering the simulated precipitation data, as the Global Circulation Models account for an additional uncertainty regarding precipitation projections [22,24,33]. The performance of the climate models in relation to the observed precipitation data (BR-DWGD) was verified by statistical metrics (σ_{sim} , σ_{obs} , RMSE, and RMSE_{bias}) that also allowed the analysis of the index D_{Pielke} [2]. In this index, three criteria are evaluated:

1. $\sigma_{\text{sim}} \cong \sigma_{\text{obs}}$;
2. $\text{RMSE} < \sigma_{\text{sim}}$;
3. $\text{RMSE}_{\text{bias}} < \sigma_{\text{sim}}$

Therefore, if the three criteria are fulfilled, the index of D_{Pielke} can be calculated by Equation (1).

$$D_{\text{Pielke}} = \text{ABS} \left(1 - \frac{\sigma_{\text{sim}}}{\sigma_{\text{obs}}} \right) + \frac{\text{RMSE}}{\sigma_{\text{obs}}} + \frac{\text{RMSE}_{\text{bias}}}{\sigma_{\text{obs}}} \quad (1)$$

where σ_{sim} is the standard deviation of the simulated data, σ_{obs} is the standard deviation of the observed data, RMSE is the Root Mean Squared Error, and RMSE_{bias} is the Mean Square Error after the removal of a constant bias.

If D_{Pielke} index < 2 , the model is adequate [34]. Therefore, the lowest value of the index indicates better simulations. Based on this index, the best GCM that performs satisfactorily in the Paraopeba River Basin can be identified. The index was satisfactorily applied in the study conducted by [31], which evaluated temperature and precipitation simulations for Brazil using CMIP6 data.

Finally, it used the correlation (CORR) that evaluates the performance of the simulated data (ensemble) against the observed data in the following database: Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD) [32]. For this assessment, the thresholds established by [35] were adopted, as is shown in Table 1.

Table 1. Correlation thresholds established by [35].

Classification	CORR
Very Strong	$\text{CORR} \geq 0.9$
Strong	$0.7 \leq \text{CORR} < 0.9$
Moderate	$0.5 \leq \text{CORR} < 0.7$
Weak	$0.3 \leq \text{CORR} < 0.5$
Very weak	$0 \leq \text{CORR} < 0.3$

2.5. Drought Indices: Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI)

Precipitation data are required to calculate the Standardized Precipitation Index (SPI) index. The Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI), on the other hand, requires temperature data in addition to precipitation. For the study area, these datasets were obtained from the best NEX-GDDP-CMIP6 models.

The Standardized Precipitation Index (SPI) is a metric used to evaluate wet and dry periods across multiple timescales, based exclusively on precipitation data. Its calcula-

tion involves fitting historical precipitation records to a PDF, typically a gamma distribution. Subsequently, transforming the resulting probabilities via the inverse standard Gaussian distribution to obtain “z” values that represent the SPI. The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), as developed by [10], incorporates not only precipitation but also potential evapotranspiration within an atmospheric water balance framework ($P - ET$). For estimating potential evapotranspiration, it is recommended to employ a method that utilizes mean monthly temperature data [36].

In the study, both SPI and SPEI analyses were performed using the SPEI package in the RStudio software (version 1.1.456). It is important to highlight that the package uses default log-logistic distribution for the SPEI [37] and Gamma distribution for the SPI [38]. However, the parameter distribution can be modified by the user. The SPI and SPEI can be calculated across various timescales; in this study two temporal scales, six and twelve months, were used (SPI-6, SPI-12, SPEI-6, and SPEI-12). For drought characterization, negative values correspond to drought conditions, while positive values indicate wet conditions (Table 2).

Table 2. Classification of drought occurrence.

SPI and SPEI	Classification
>2.0	Extremely wet
1.5 to 1.99	Severely wet
1.00 to 1.49	Moderately wet
0.1 to 0.99	Incipient wet
0 to −0.99	Abnormally
−1.00 to −1.49	Moderately dry
−1.50 to −1.99	Severely dry
>−2.0	Extremely dry

3. Results

3.1. Climate Model Performances and Drought for the Current Scenario

The initial step involved assessing the GCM simulations using the selected performance statistics. In this context, seven models with the lowest D_{Pielke} values were selected: ACCESS-ESM1-5, TaiESM1, CMCC-ESM2, MPI-ESM1-2-LR-1, NorESM2-MM, MRI-ESM2, and CanESM5, as shown in Table 3.

Table 3. Monthly precipitation simulated by the climate models analyzed in the period from 1992 to 2014 (current scenario).

Model	σ_{sim}	σ_{obs}	RMSE	RMSE _{bias}	D_{Pielke}
ACCESS-ESM1-5	103.96	104.69	10.50	9.80	0.20
TaiESM1	102.61	104.69	10.93	10.80	0.22
CMCC-ESM2	104.56	104.69	12.44	11.54	0.23
MPI-ESM1-2-LR-1	104.87	104.69	12.72	12.15	0.24
NorESM2-MM	108.84	104.69	14.94	14.59	0.24
MRI-ESM2	102.59	104.69	13.04	13.04	0.27
CanESM5	103.78	104.69	14.25	13.96	0.28
INM-CM5-0	102.11	104.69	13.80	12.80	0.28
EC-Earth3-Veg-LR	100.59	104.69	13.28	13.23	0.29
INM-CM4-8	107.74	104.69	18.14	16.48	0.30
MIROC6	103.00	104.69	16.60	16.31	0.33
EC-Earth 3	103.16	104.69	17.63	16.91	0.34
GFDL-ESM4	100.42	104.69	15.78	15.76	0.34
ACCESS-CM2-1	102.85	104.69	17.51	17.10	0.35
MPI-ESM1-2-HR	102.62	104.69	20.88	19.85	0.41

Based on these precision statistics, these seven models are adequate to promote SPI and SPEI projections in the Paraopeba River Basin. The ACCESS-ESM1-5 model showed the

lowest D_{Pielke} index and the best precipitation simulation results (Table 3). These climate models are also aligned with the results of [39], as four of them are ranked in the Top 10 CMIP6 for representing South America's climate. Additionally, Ref. [31] found that climate models (CMIP6) accurately fit the climate of the Minas Gerais state, the region where the Paraopeba River Basin is located.

Regarding the mean ensemble of the seven climate models' selected performance, there is a strong correlation between them ($CORR = 0.99$) (Figure 2). Thus, the mean ensemble of the selected models of the NEX-GGDP-CMIP6 collection showed good performance when compared to the observed data (BR-DWGD). The results are shown in Table 3 and Figure 2.

Figures 3 and 4 present SPI and SPEI calculations derived from an ensemble of seven climate models (NEX-GGDP-CMIP6) and observed data sourced from the BR-DWGD database under the current scenario. Figure 3a–d) demonstrates that simulated data corresponds with observed data for both drought indices across the two time scales. Similar patterns appear in Figure 4a–d, with correlation coefficients between 0.43 and 0.56. Differences are more apparent and sporadic in SPI-6, SPI-12, and SPEI-6. The index's magnitude increases notably for SPEI-12 (Figures 3d and 4d).

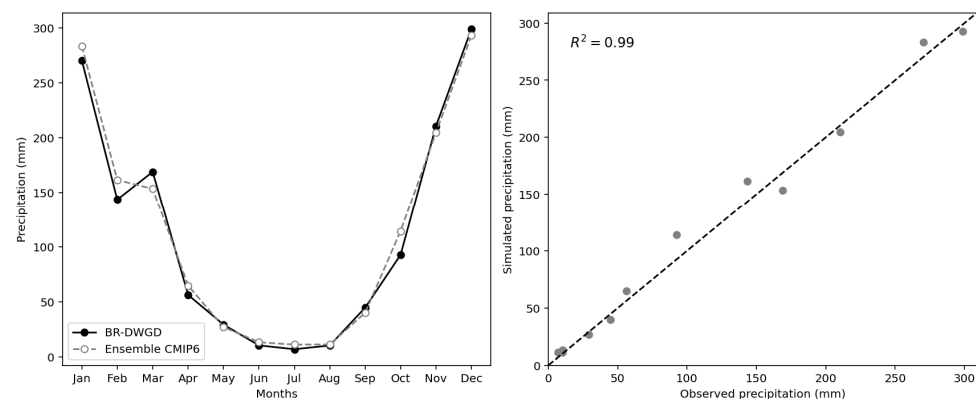


Figure 2. Mean monthly precipitation of the seven GCMs (ensemble) and the observed data from the BR-DWGD in the current scenario.

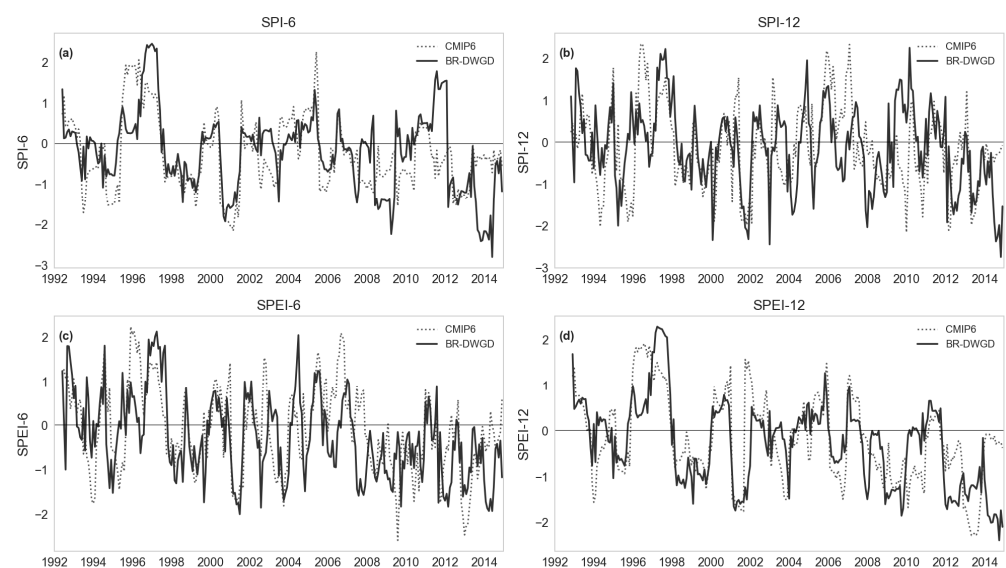


Figure 3. Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) estimated by the ensemble climate model and with observed climate data for the Paraopeba River Basin. (a) SPI-6—six months; (b) SPI-12—twelve months; (c) SPEI-6—six months; and (d) SPEI-12—twelve months.

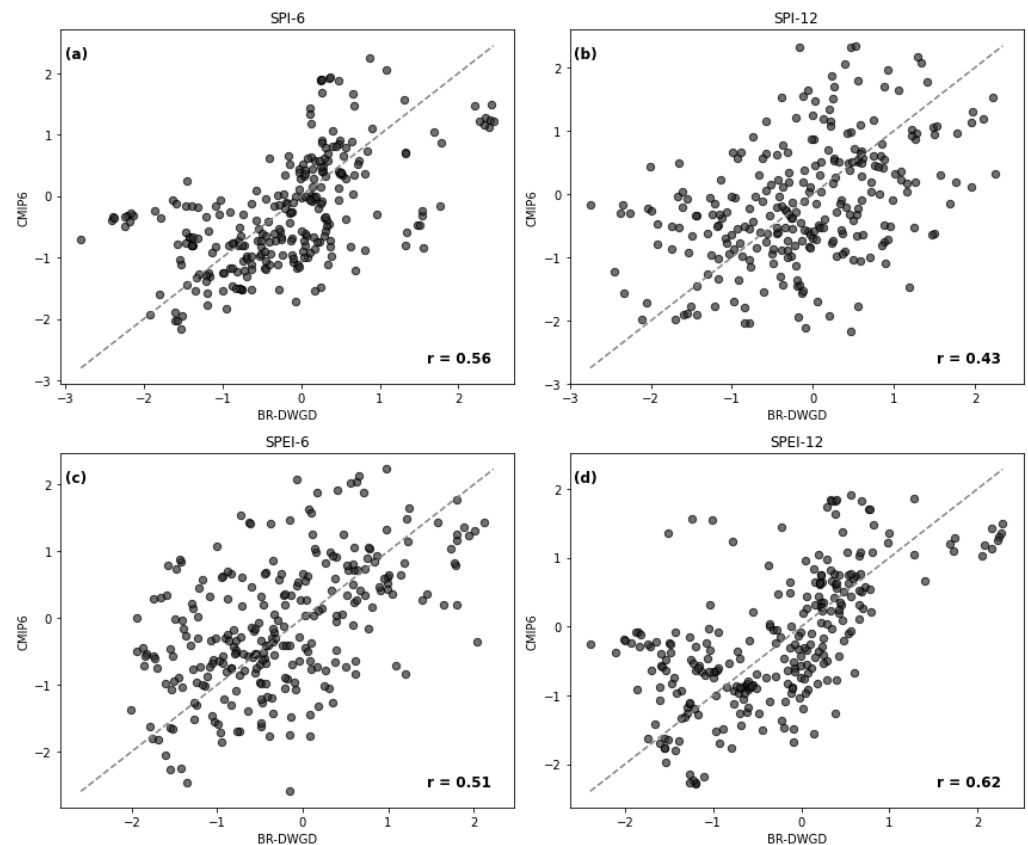


Figure 4. Scatter plots comparing SPI and SPEI values derived from the ensemble climate models (NEX-GDDP-CMIP6) versus BR-DWGD, for the period 1992 to 2014 and for different timescales. (a) SPI-6—six months; (b) SPI-12—twelve months; (c) SPEI-6—six months; (d) SPEI-12—twelve months.

The datasets show agreement (Figure 3a–d), indicating that the ensemble of climate models can be applied to monitor meteorological drought projections. These findings align with those of [40], who highlighted that variations among datasets may result from various sources of uncertainty, such as meteorological data interpolation, spatial resolution effects, and station data gaps—factors that can influence the fitted statistical distribution, particularly at its extremes.

3.2. SPI and SPEI Projections

The SPI, in the SSP245 scenario presents alternating periods of rain and drought, with most dry periods classified as abnormally dry and severe drought (Figure 5a,b). For the period from 2080 to 2090, droughts have become more frequent and severe, with extreme droughts being observed.

Under the SSP585 scenario, there is notable interannual variability across all cases, along with a trend indicating increased frequency and intensity of drought events, particularly toward the end of the century (SPI < −2). The SPI-12 scenario indicates more extended and clearly defined droughts compared to the SPI-6, suggesting longer-lasting impacts on drought conditions (Figure 5c,d).

It is important to note that, while the SPI can predict droughts, a more realistic assessment of drought conditions is achieved through indices such as the SPEI. Considering the SPEI under the SSP245 scenario at the six-month timescale indicates an increase in drought events, mainly at the end of the century. In the period from 2061 to 2080, moderate and severe droughts account for approximately 15.79% and 7.89% of observed cases. By the end of the century, our projections suggest a reduction in abnormal droughts and a rise

in severe and moderate drought occurrences, expected to account for 26.09% and 22.28% of occurrences, respectively (Figure 6a,b).

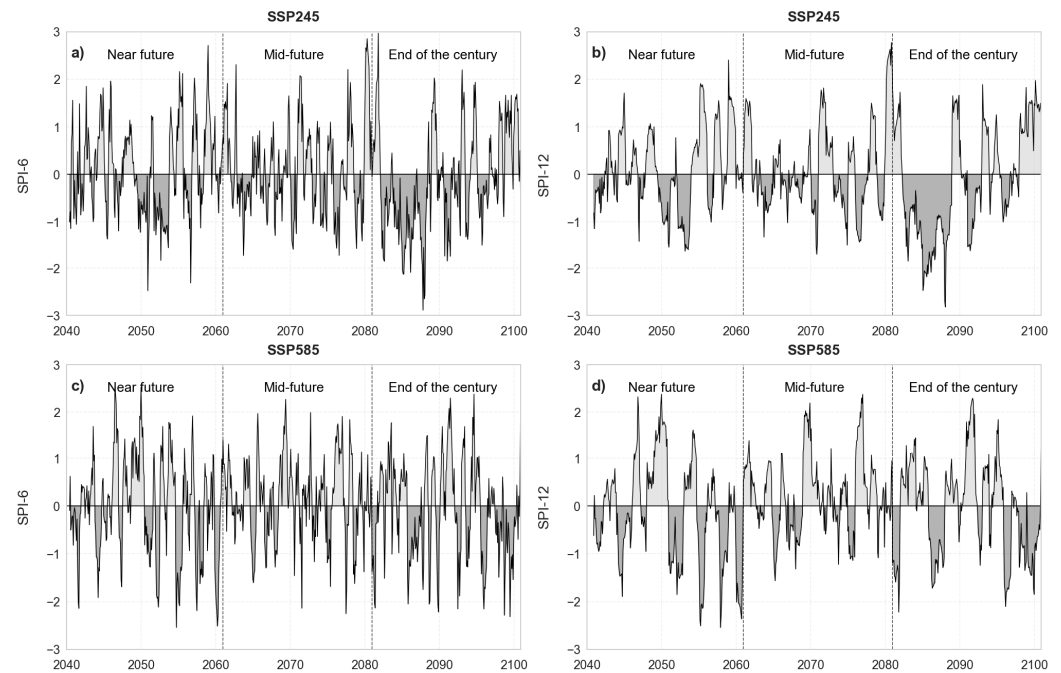


Figure 5. Standardized Precipitation Index (SPI) projected over the 21st century for the Paraopeba River Basin: (a) scenario SSP245—six months; (b) scenario SSP245—twelve months; (c) scenario SSP585—six months; and (d) scenario SSP585—twelve months.

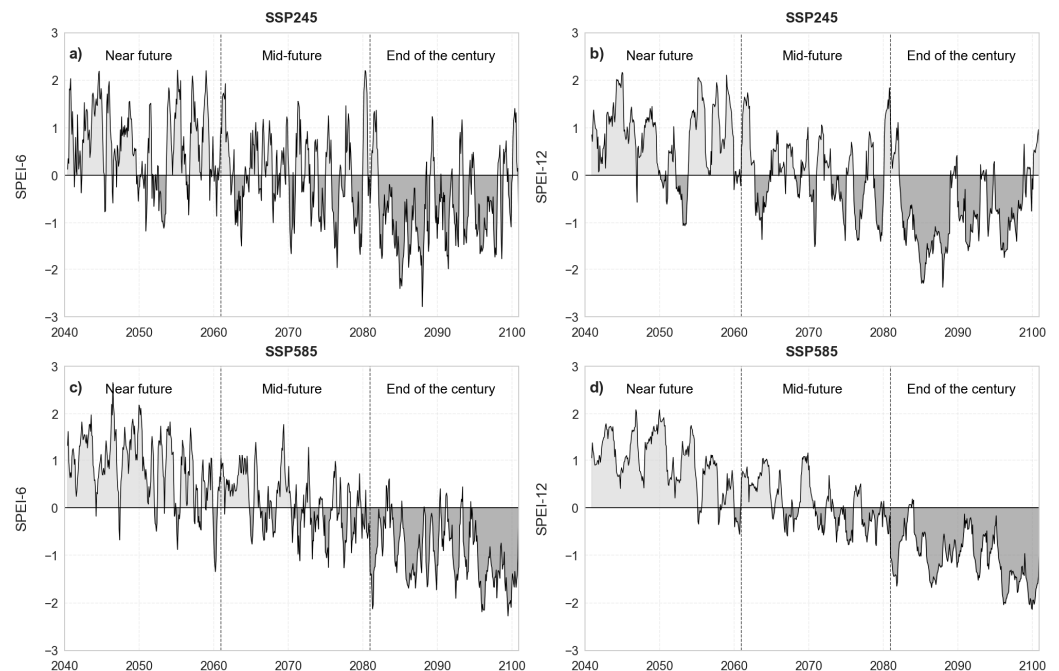


Figure 6. Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) projected over the 21st century for the Paraopeba River Basin: (a) scenario SSP245—six months; (b) scenario SSP245—twelve months; (c) scenario SSP585—six months; and (d) scenario SSP585—twelve months.

Considering the SSP585 scenario (Figure 6c,d), abnormal droughts mostly occur in the periods 2040–2061 and 2061–2080. Moderate droughts represent 8.33% of the events for the near future, declining by half for the mid-future period. In contrast, by the end of the century,

extreme and moderate droughts are projected to increase by 5.53% and 34.10%, respectively. Abnormally dry and severe droughts are less frequent than in the SSP245 scenario.

The observed increases in the SPEI-6 and SPEI-12 reflect dry and prolonged events that correspond with the substantial temperature rises anticipated by the end of the century under the SSP585 scenario (Figure 6c,d). As a result, precipitation is insufficient to meet atmospheric water demand, leading to a notable water deficit in the Paraopeba River Basin. Consistent with the findings of [40], this study demonstrated that the trends were more pronounced for SPEI than for the SPI, highlighting the influence of rising temperatures.

Figure 7 presents an analysis of the SPEI and SPI using box plots for three periods: 2040–2060 (near future), 2061–2080 (mid-future), and 2081–2100 (end of the century). In the near future, positive means were observed with slightly lower values in the SSP585 scenario compared to SSP245 scenario. For 2081–2100, SPEI-12 indicates drier conditions compared to the SPEI-6 timescale, suggesting a higher prevalence of water deficits under the higher emission scenario. Additionally, this scenario displays a lower interquartile variation, which may reflect reduced interannual variability and persistent dry conditions throughout the period.

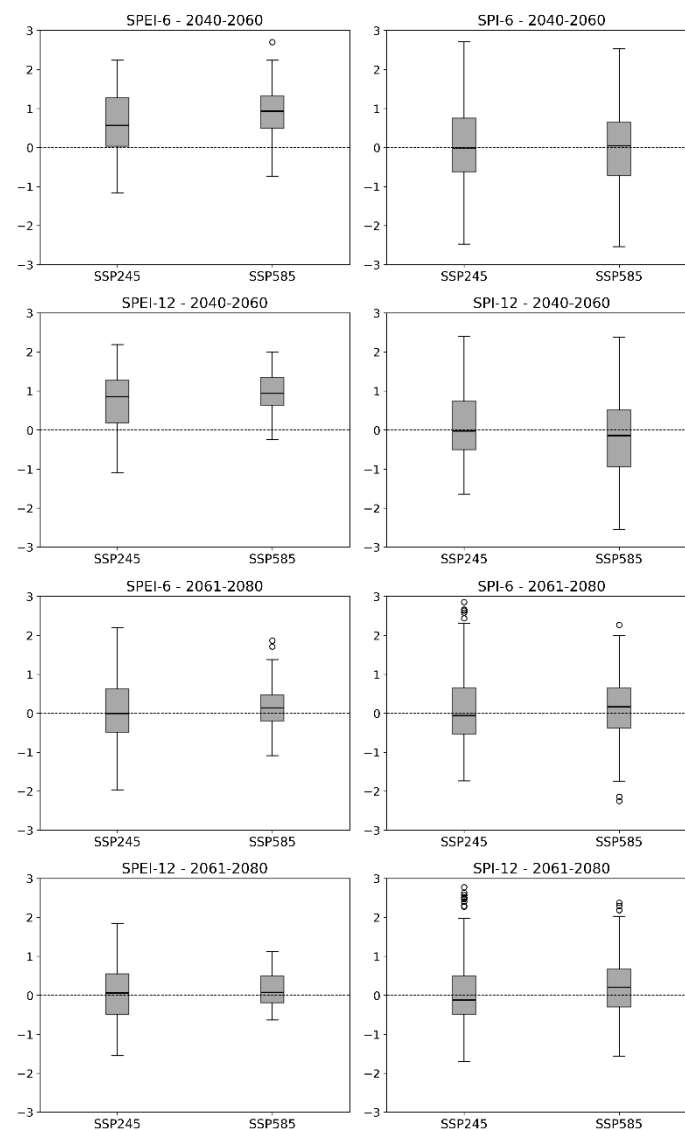


Figure 7. Cont.

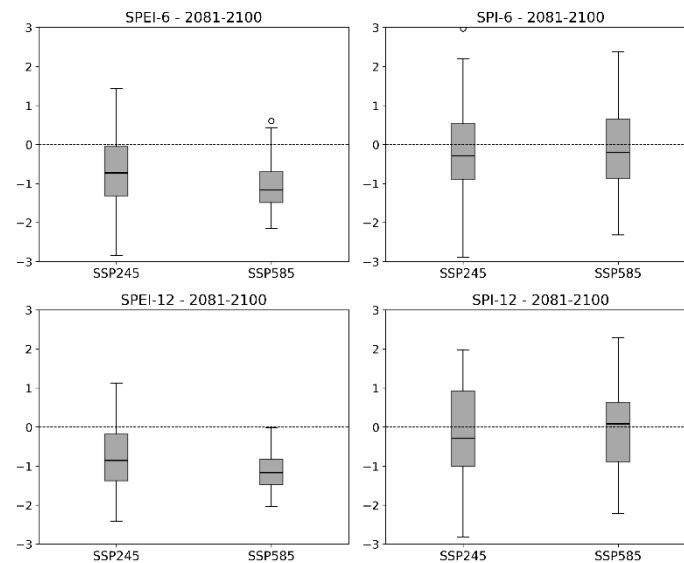


Figure 7. Boxplot of 2040–2060, 2061–2080, and 2081–2100 periods for the SPI and SPEI for the Paraopeba River Basin, in the SSP245 and SSP585 scenarios and timescale of six and twelve months.

4. Discussion

Promoting greater awareness of drought is essential [17,18]. Increasingly arid conditions can jeopardize water availability for various needs, including human consumption, agriculture, industry, and hydropower generation, and have significant impacts on the conservation of aquatic ecosystems and biodiversity. Droughts are further linked to heightened risks of severe fires and soil degradation. Anticipated water conflicts in the study region will be significant, such as drinking water resources, agricultural irrigation, and hydropower production, which are substantial demands in the Paraopeba River Basin. The quantification of recent and projected droughts under SSP scenarios reveals a trend of more frequent and intense droughts as a consequence of climate change. The ecological and socioeconomic effects may potentially contribute to broader societal disruptions in the future. Enhanced scientific understanding of drought dynamics, their impacts, and temporal changes is critical for informing policymakers, water resource managers, and the public.

Climate signals have provoked a disruptive effect on the Brazil's energy security [3,4,38]. Considering that 64% percent of country's total electricity supply is provided by hydropower, climate oscillation has affected hydroelectric outputs, and demand–supply needs to shift to higher-cost thermal power, a mix of renewables, and fossil fuel-based generation during drought periods. Additionally, other similar results are reported by [41] in Brazil, using the SPEI and several climate models (CMIP6 CM6, CM6HR, HadGEM3, IPSL, ESM2, Earth3, and UKESM1) suggested that by 2075, droughts may account for approximately 35% of the country's agricultural production loss.

The SPEI and SPI produced different results because the former index accounts for increased evapotranspiration due to rising temperatures [3], mainly for the end of the century, under a high emission scenario (SSP585). Since the SPI only considers precipitation, the SPEI incorporates atmospheric evaporative demand, increasing its sensitivity to climate changes. The analysis indicates a continuous water deficit, primarily associated with higher rates of evapotranspiration. The SPEI could be more appropriate than the SPI to monitor drought conditions potentialized by warming conditions, especially in longer timescales, as verified in the end of century scenario.

This study uses a twelve-month timescale to assess meteorological drought, which can support future investigations into the links between meteorological and hydrological

droughts. These findings are relevant for hydrological modeling and projecting drought impacts on livelihoods and economic development.

The limitations of this research include reliance on the Thornthwaite method for potential evapotranspiration, which only uses temperature and may not be accurate under future climate conditions. Future research should adopt more physically based methods, such as the reference evaporation used in [40].

Discrepancies may occur because the downscaled projections were bias-corrected using an observational dataset that does not include all stations present in the BR-DWGD dataset (as shown in Figures 3 and 4). Bias correction of CMIP6 current scenarios using BR-DWGD directly could prevent these differences and is expected to offer a more accurate representation of the spatial variability of the SPI and SPEI, given the broader coverage of surface observations in the BR-DWGD dataset. Uncertainties remain in future climate scenarios due to limitations in the climate models' ability to reproduce the magnitude and duration of drought, as noted by [33], which also impacts estimations of the SPI and SPEI.

5. Conclusions

The results of this study showed that the climate models (CMIP6), obtained by the NEX-GDDP-CMIP6 collection, can represent the precipitation and drought patterns in the Paraopeba River Basin. With the use of performance metrics, the models ACCESS-ESM1-5, TaiESM1, CMCC-ESM2, MPI-ESM1-2-LR-1, NorESM2-MM, MRI-ESM2-0, and CanESM5 showed the best performance for the basin.

To characterize the drought, the SPI and SPEI were adopted in two time scales (six and twelve months). Future projections from 2040 to 2100 and two scenarios, SSP245 (intermediate) and SSP585 (pessimistic), were considered. On both time scales analyzed, there was an increase in extreme, moderate, and severe droughts at the end of the century. Severe droughts can increase by 12.24% and 8.59% (SPI) and 22.8% and 17.97% (SPEI) on the six-month timescale, in the SSP245 and SSP585 scenarios, respectively. On the twelve-month timescale, these droughts can increase by 17.14% (SPI), 19.25% (SPEI), 17.12% (SPI), and 19.21% (SPEI), respectively, for the SSP245 and SSP585 scenarios.

Under analysis by the SPEI, it is verified that by the end of the century (2081–2100) there will be an increase in the magnitude of droughts, especially due to the increase in evapotranspiration, which contributes to greater climate dryness. In this period, there is a tendency for the occurrence of prolonged droughts. Thus, the SPI does not accurately reflect the spatial and temporal variability of drought conditions in the context of climate change, but the SPEI does. In general, the SPEI can be a good indicator for assessing drought, as it revealed that water deficit projections might occur, especially in the SSP585 scenario in the twelve-month timescale.

Droughts increase socioeconomic and environmental vulnerability, compromising the water availability of a basin, putting its food, energy, and economic security at risk. Considering that the Paraopeba River Basin plays a strategic role in the generation of electricity and in urban water supply, our results can be used for the projection of drought under the effects of climate change. The results of this study can contribute to guiding public policies for the mitigation and adaptation to these extreme events, to strengthen the resilience of water systems, and ensure the sustainability of natural resources in the region.

Author Contributions: Conceptualization, C.M.d.A. and L.A.A.; methodology, C.M.d.A., L.A.A., P.A.M., J.T., C.R.d.M. and P.R.F.P.; validation, C.M.d.A. and L.A.A.; formal analysis, C.M.d.A., L.A.A., P.A.M. and J.T.; investigation, C.M.d.A. and L.A.A.; writing—original draft preparation C.M.d.A., L.A.A., P.A.M., J.T., C.R.d.M. and P.R.F.P.; writing—review and editing, C.M.d.A., L.A.A., P.A.M., J.T., C.R.d.M. and P.R.F.P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was supported by the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) [Grant number APQ-00709-21], Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [Grant number 305295/2021-7] and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [Grant number 305711/2024-5].

Data Availability Statement: The data are not publicly available.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

CMIP6I	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
CORR	Correlation
BR-DWGD	Brazilian Daily Weather Gridded Data
GCM	Global Climate Models
SPEI	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
SPI	Standardized Precipitation Index
SSPs	Shared Socioeconomic Pathways
RMSE	Root Mean Squared Error
RMSEbias	Mean Square Error After the Removal of a Constant Bias

References

1. Gebrechorkos, S.H.; Sheffield, J.; Vicente-Serrano, S.M.; Funk, C.; Miralles, D.G.; Peng, J.; Dyer, E.; Talib, J.; Beck, H.E.; Singer, M.B.; et al. Warming Accelerates Global Drought Severity. *Nature* **2025**, *642*, 628–635. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. Pujol-Buxó, E.; Montori, A. Assessing the Risks of Extreme Droughts to Amphibian Populations in the Northwestern Mediterranean. *Land* **2025**, *14*, 1668. [[CrossRef](#)]
3. de Oliveira, C.d.M.M.; Alvarenga, L.A.; Silva, V.O.; Carvalho, V.S.O.; Caminha, A.R.; Melo, P.A. Projeção Dos Eventos de Seca Meteorológica e Hidrológica Na Bacia Hidrográfica Do Rio Verde. *Rev. Bras. De Meteorol.* **2024**, *39*, e39240059. [[CrossRef](#)]
4. Mello, C.R.; Guzman, J.A.; Vieira, N.P.A.; Viola, M.R.; Beskow, S.; Guo, L.; Alvarenga, L.A.; Rodrigues, A.F. Mitigating Severe Hydrological Droughts in the Brazilian Tropical High-Land Region: A Novel Land Use Strategy under Climate Change. *Int. Soil Water Conserv. Res.* **2025**, *13*, 627–643. [[CrossRef](#)]
5. Lawren, J.; Santos, C.; Silva, T. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Crise Hídrica Na Bacia Hidrográfica Do Manancial Serra Azul (Minas Gerais). In Proceedings of the XXI SBRH—Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, Brazil, 27 November 2015.
6. Barros da Silva, B.M.; Da Silva, D.D.; Moreira, M.C. Índices Para a Gestão e Planejamento de Recursos Hídricos Na Bacia Do Rio Paraopeba, Estado de Minas Gerais. *Rev. Ambiente Água* **2015**, *10*, 685–697.
7. Pinto, P.R.F. Segurança Hídrica Na Bacia Hidrográfica Do Rio Paraopeba 2024. Master's Thesis, Federal University of Lavras, Lavras, Brazil, 2024.
8. Honorato, P.A.d.R.; Elmiro, M.A.T.; Nero, M.A.; Temba, P.d.C.; Jardim, H.L. A Contribuição Do Modelo FPEIR/TOPSIS No Diagnóstico Ambiental Da Segurança Hídrica de Áreas Atingidas Pela Barragem B1, Brumadinho, MG. *Soc. Nat.* **2025**, *37*, e74110. [[CrossRef](#)]
9. Vicq, R.; Leite, M.G.P.; Leão, L.P.; Nalini Júnior, H.A.; da Cunha e Silva, D.C.; Fonseca, R.; Valente, T. Hydrogeochemistry of Surface Waters in the Iron Quadrangle, Brazil: High-Resolution Mapping of Potentially Toxic Elements in the Velhas and Paraopeba River Basins. *Water* **2025**, *17*, 2446. [[CrossRef](#)]
10. Dutra, D.J.; Elmiro, M.A.T. Técnicas de Sensoriamento Remoto Aplicados na Análise de Seca em Bacias Hidrográficas: Estudo de Caso na Sub-Bacia Do Ribeirão Serra Azul-MG. *Caminhos De Geogr.* **2024**, *25*, 21–43. [[CrossRef](#)]
11. Vicente-Serrano, S.M.; Beguería, S.; López-Moreno, J.I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Clim.* **2010**, *23*, 1696–1718. [[CrossRef](#)]
12. Teixeira, S.; Gonçalves, N.; Das, F.; Vasconcelos Junior, C.; Sakamoto, M.S.; Da, C.; Silveira, S.; Passos, E.S.; Martins, R. Índices e Metodologias de Monitoramento de Secas: Uma Revisão. *Rev. Bras. Meteorol.* **2021**, *36*, 495–511.
13. Abu Arra, A.; Şişman, E. Correction: Abu Arra, A.; Şişman, E. Characteristics of Hydrological and Meteorological Drought Based on Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves. *Water* **2023**, *15*, 3142.

14. Royer, A.C.; Figueiredo, T.d.; Fonseca, F.; Schütz, F.C.d.A.; Hernández, Z. Tendências de Mudança Na Precipitação e Na Susceptibilidade à Seca Avaliada Pelo Índice de Precipitação Normalizada (SPI) No Nordeste de Portugal. *Territorium* **2021**, *28*, 13–26.
15. Souza, M.D.; Dallacort, R.; Dias, V.R.d.M.; Fenner, W.; Tieppo, R.C.; Oliveira, G.C. Análise da Precipitação e Identificação de Eventos de Seca em Municípios do Oeste de Mato Grosso por Meio dos Índices SPEI-3 E SPEI-6. *Nativa* **2024**, *12*, 706–715. [\[CrossRef\]](#)
16. Stagge, J.H.; Tallaksen, L.M.; Gudmundsson, L.; Van Loon, A.F.; Stahl, K. Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI). *Int. J. Clim.* **2015**, *35*, 4027–4040.
17. Liu, J.; Xia, J.; Wang, M. Comparative Study on Bivariate Statistical Characteristics of Drought in Shandong Using SPI and SPEI. *Sci. Rep.* **2025**, *15*, 11268. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
18. Vicente-Serrano, S.M.; Beguería, S.; Lorenzo-Lacruz, J.; Camarero, J.J.; López-Moreno, J.I.; Azorin-Molina, C.; Revuelto, J.; Morán-Tejeda, E.; Sanchez-Lorenzo, A. Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. *Earth Interact.* **2012**, *16*, 1–27.
19. McKee, T.B.; Doesken, N.J.; Kleist, J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Eighth Conf. Appl. Climatol.* **1993**, *17*, 179–184.
20. dos Santos, D.C. Atmospheric Teleconnections and Their Impact on Precipitation Patterns in the Brazilian Legal Amazon: Insights from the Standardized Precipitation Index (SPI). *Theor. Appl. Clim.* **2025**, *156*, 139. [\[CrossRef\]](#)
21. Fernanda, P.; Gonçalves, A.; Potozky De Oliveira, R.; Carpenedo, C.B. Eventos de Seca e Estiagem no Estado do Paraná Associados ao Índice SPEI. In Proceedings of the IV Encontro Nacional de Desastres—Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Curitiba, Brazil, 11 October 2024.
22. Carvalho, V.S.O.; Alvarenga, L.A.; Melo, P.A.; Tomasella, J.; de Mello, C.R.; Martins, M.A. Climate Change Impact Assessment in a Tropical Headwater Basin. *Rev. Ambiente Água* **2022**, *17*, e2753.
23. Alvarenga, L.A.; Carvalho, V.S.O.; de Oliveira, V.A.; de Mello, C.R.; Colombo, A.; Tomasella, J.; Melo, P.A. Hydrological Simulation with SWAT and VIC Models in the Verde River Watershed, Minas Gerais. *Rev. Ambiente Água* **2020**, *15*, e2492.
24. Zákhaia, E.M.S.; Alvarenga, L.A.; Tomasella, J.; Martins, M.A. Avaliação de Projeções Climáticas Para Uma Bacia Experimental, Localizada Na Região Sul de Minas Gerais. *Rev. Ibero-Am. De Ciências Ambient.* **2020**, *11*, 234–250. [\[CrossRef\]](#)
25. Alvarenga, L.A.; de Mello, C.R.; Colombo, A.; Cuartas, L.A.; Chou, S.C. Hydrological Responses to Climate Changes in a Headwater Watershed. *Ciência E Agrotecnologia* **2016**, *40*, 647–657. [\[CrossRef\]](#)
26. Thrasher, B.; Wang, W.; Michaelis, A.; Melton, F.; Lee, T.; Nemani, R. NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Sci. Data* **2022**, *9*, 262. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
27. Samuel, S.; Mengistu Tsidu, G.; Dosio, A.; Mphale, K. Assessment of Historical and Future Mean and Extreme Precipitation Over Sub-Saharan Africa Using NEX-GDDP-CMIP6: Part I—Evaluation of Historical Simulation. *Int. J. Climatol.* **2025**, *45*, 8672. [\[CrossRef\]](#)
28. de Mendonça, L.M.; Blanco, C.J.C.; da Silva Cruz, J. Performance and Projections of the NEX-GDDP-CMIP6 in Simulating Precipitation in the Brazilian Amazon and Cerrado Biomes. *Int. J. Climatol.* **2024**, *44*, 3726–3741. [\[CrossRef\]](#)
29. Dias, C.G.; Martins, F.B.; Martins, M.A. Climate Risks and Vulnerabilities of the Arabica Coffee in Brazil under Current and Future Climates Considering New CMIP6 Models. *Sci. Total Environ.* **2024**, *907*, 167753. [\[CrossRef\]](#)
30. Rodrigues, R.; Coorientador, T.; Flávio Justino, B.; Castro, M.P. Áreas Protegidas do Cerrado: Vulnerabilidade e Adaptação Às Mudanças Climáticas. Master's Thesis, Federal University of Viçosa, Viçosa, Brazil, 2023.
31. Rodrigues, S.W.; Correa, W.d.S.C. *Um Alerta Vermelho Para a Humanidade: As Principais Conclusões Dos Três Relatórios de Avaliação (AR6) Do IPCC de 2021 e 2022*; Instituto de Estudos Climáticos: Espírito Santo, Brazil, 2022; pp. 1–53.
32. Xavier, A.C.; Scanlon, B.R.; King, C.W.; Alves, A.I. New Improved Brazilian Daily Weather Gridded Data (1961–2020). *Int. J. Climatol.* **2022**, *42*, 8390–8404. [\[CrossRef\]](#)
33. Melo, P.A.; Alvarenga, L.A.; Tomasella, J.; de Mello, C.R.; Martins, M.A.; Coelho, G. Analysis of Hydrological Impacts Caused by Climatic and Anthropogenic Changes in Upper Grande River Basin, Brazil. *Environ. Earth Sci.* **2022**, *81*, 504. [\[CrossRef\]](#)
34. Pielke, R.A.S. *Mesoscale Meteorological Modeling*, 3rd ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2013; pp. 1–570.
35. Mukaka, M.; Moulton, L.H. Comparison of Empirical Study Power in Sample Size Calculation Approaches for Cluster Randomized Trials with Varying Cluster Sizes—A Continuous Outcome Endpoint. *Open Access Med. Stat.* **2016**, *6*, 1–7. [\[CrossRef\]](#)
36. Thornthwaite, C.W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geogr. Rev.* **1948**, *38*, 55. [\[CrossRef\]](#)
37. Beguería, S.; Vicente-Serrano, S.M.; Reig, F.; Latorre, B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Clim.* **2014**, *34*, 3001–3023. [\[CrossRef\]](#)
38. Guttman, N.B. Accepting the Standardized Precipitation Index: A Calculation Algorithm. *J. Am. Water Resour. Assoc.* **2007**, *35*, 311–322. [\[CrossRef\]](#)
39. Bazzanella, A.C.; Dereczynski, C.; Luiz-Silva, W.; Regoto, P. Performance of CMIP6 Models over South America. *Clim. Dyn.* **2024**, *62*, 1501–1516. [\[CrossRef\]](#)

40. Tomasella, J.; Cunha, A.P.M.A.; Simões, P.A.; Zeri, M. Assessment of Trends, Variability and Impacts of Droughts across Brazil over the Period 1980–2019. *Nat. Hazards* **2023**, *116*, 2173–2190. [[CrossRef](#)]
41. Cavalcanti, F.; Helfand, S.M.; Moreira, A. Climate Change, Drought, and Agricultural Production in Brazil. In Proceedings of the 32nd Internacional Conference of Agricultural, New Delhi, India, 27 August 2024.

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Artigo 2 - Redigido conforme norma do periódico científico - Versão publicada	
Título do artigo:	ARTIGO 2: Impacts of Climate Change on the Hydrology of a Highly Disturbed Tropical River Basin
Autores:	Claudiana Mesquita de Alvarenga Lívia Alves Alvarenga Pâmela Aparecida Melo Javier Tomasella Carlos Rogério de Mello Pâmela Rafanele França Pinto
Periódico:	Revista Earth MDPI
ISSN	2673-4834
DOI	https://doi.org/10.3390/earth7020052

Article

Impacts of Climate Change on the Hydrology of a Highly Disturbed Tropical River Basin

Claudiana Mesquita de Alvarenga ¹, Lívia Alves Alvarenga ^{1,*} , Pâmela Aparecida Melo ², Javier Tomasella ³ , Pâmela Rafanele França Pinto ¹ , Carlos Rogério de Mello ¹  and Jorge M. G. P. Isidoro ⁴ 

¹ Departamento de Recursos Hídricos, Universidade Federal de Lavras, Lavras 37203-202, Brazil; claudina.alvarenga1@estudante.ufla.br (C.M.d.A.); pâmela.pinto3@estudante.ufla.br (P.R.F.P.); crmello@ufla.br (C.R.d.M.)

² Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), Estrada Dr. Altino Bondesan 500, São José dos Campos 12247-016, Brazil; pâmela.melo@cemaden.gov.br

³ Centro de Ciência do Sistema Terrestre, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Cachoeira Paulista 12630-970, Brazil; javier.tomasella@inpe.br

⁴ Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia, Universidade do Algarve, CIMA—Centro de Investigação Marinha e Ambiental/ARNET—Rede de Investigação Aquática, 8005-139 Faro, Portugal; jisidoro@ualg.pt

* Correspondence: livia.aalvarenga@ufla.br

Abstract

Climate change significantly affects hydrological responses, yet studies addressing future water availability in the Paraopeba River Basin (PRB), an important tributary of the São Francisco River Basin in Brazil, remain limited, particularly under CMIP6 scenarios and using distributed hydrological modeling approaches. In this context, this study evaluated the hydrological responses of the PRB, under climate change using the MHD-INPE. Future projections were based on an ensemble of seven climate models from the NEX-GDDP-CMIP6 collection, considering a baseline period (1992–2014), three future periods 17(2040–2060, 2061–2080 and 2081–2100) and two socioeconomic scenarios (SSP245 and SSP585). The model satisfactorily reproduced observed streamflow during the baseline period. Under the SSP585 scenario, the projections indicate stronger alterations in water availability, with a potential intensification of flood and drought events, as reflected by reductions in minimum streamflows (Q_{90}) and increases in maximum streamflows (Q_{10}), particularly in sub-basins 4 and 5, where Q_{90} reductions approach 30% and Q_{10} increases reach 11.7%. Additionally, a decrease in $Q_{7,10}$ values was observed, which enabled the analysis of the Conflict Index (Icg), indicating that water withdrawals currently granted may exceed the limits established by existing legislation in future scenarios ($I_{cg} > 1$).

Keywords: hydrological modeling; MHD-INPE; water availability; climate change; Paraopeba River Basin; CMIP6



Academic Editor: Charles Jones

Received: 28 January 2026

Revised: 6 March 2026

Accepted: 11 March 2026

Published: 18 March 2026

Copyright: © 2026 by the authors.

Licensee MDPI, Basel, Switzerland.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

1. Introduction

The Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) indicates that global surface temperature is approaching and in some recent records exceeding the 1.5 °C threshold, highlighting the acceleration of climate change and its intensification in recent decades [1–3]. These climatic changes disrupt the hydrological cycle, increasing the frequency and intensity of extreme events such as droughts, heat waves, and extreme precipitation [4–6]. Such changes directly affect water availability, posing risks to ecosystems, infrastructure, and water-dependent economic sectors.

Hydrological imbalances intensify competition among multiple water uses, amplifying social, environmental, and economic vulnerabilities [7–9]. In this context, the Paraopeba River Basin (PRB), an important tributary of the São Francisco River, plays a strategic role in regional water security. The basin supplies approximately 53% of the population of the Metropolitan Region of Belo Horizonte and supports industrial, mining, hydroelectric, and urban demands [10–14]. The severe water scarcity observed between 2013 and 2015 exposed the basin's vulnerability to hydroclimatic extremes and reinforced the need for robust long-term projections of water availability. Beyond climate stress, the PRB is also a highly disturbed basin, where intensive land use, mining activity, and multiple abstractions can modify runoff generation and baseflow maintenance, increasing sensitivity to both drought and flood hazards [10–14].

To evaluate hydrological responses under future climate conditions, Global Climate Models (GCMs), combined with hydrological models, have become essential tools for the mathematical representation of atmospheric processes across different time scales under future climate conditions [6,15,16]. Among the various existing GCMs, the models of the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) are particularly noteworthy. Compared to previous generations of CMIPs, CMIP6 demonstrates improvements in the simulation of temperature extremes at the global scale, in addition to a better representation of precipitation declines. In contrast to CMIP5, which only provides scenarios based on radiative forcings, the sixth phase incorporates the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), consisting of five narratives that link socioeconomic, demographic, technological, political, and institutional trends [17,18]. These narratives include the SSP245 and SSP585 scenarios, which represent intermediate and pessimistic pathways, respectively.

Among the various modeling tools in hydrology for assessing climate change, the Distributed Hydrological Model of the National Institute for Space Research (MHD-INPE) demonstrated ability to represent rainfall–runoff processes and enables the integration of atmospheric model outputs in studies of global environmental change [17]. The MHD-INPE has been used satisfactorily in studies on the impacts of climate change [13,16,17]. Ref. [16] evaluated the effects of climate change with MHD-INPE in the Ribeirão Jaguarua Watershed using three global climate models (HadGEM2-ES, Eta-MIROC5, and Eta-CanESM2) and two scenarios, RCP4.5 and RCP8.5. Similarly, ref. [17] analyzed the uncertainties in long-term runoff estimates, considering future RCP 4.5 and 8.5 scenarios, using MIROC5, HadGEM2-ES, CANESM2, and BESM climate models in Budyko and the MHD-INPE model.

Previous studies provide important foundations but also reveal methodological gaps that motivate the present work. Ref. [18] showed that changes in vegetation cover and land-use configuration can substantially alter components of the water balance, supporting the use of distributed modeling for identifying spatially heterogeneous vulnerabilities within the PRB. However, that approach was primarily designed for land-use scenarios and historical-period behavior and did not quantify climate change-driven shifts in legally relevant low-flow metrics or future multi-model uncertainty. Similarly, at the São Francisco Basin scale, ref. [19] integrated CMIP6 projections with consumptive demand trajectories and reservoir system modeling. Although these results highlight basin-wide vulnerability and the value of integrating climate with management variables, such analyses are typically conducted at macro-basin resolution, limiting their ability to identify sub-basin hotspots and to evaluate allocation metrics used in local permitting practice.

Studies in Brazilian basins have commonly linked GCM projections and hydrological models to evaluate future water availability and demand. These studies provide important demonstrations of hydrological models applicability, but they also reflect common limitations, including the predominance of RCPs forcing. Thus, the novelty of this study

lies in the systematic integration of high-resolution NEX-GDDP-CMIP6 projections with a distributed hydrological model (MHD-INPE) to evaluate climate change impacts on water availability in a highly disturbed tropical basin at sub-basin scale. In addition, this study adopts a sub-basin approach, enabling a more detailed identification of critical areas while explicitly accounting for the uneven spatial distribution of the population across the basin. In this context, assessing changes in mean streamflow alone is insufficient, as water management systems are primarily stressed during extreme conditions. The advancement of this research lies in assessing hydrological indicators directly related to water management and legislation ($Q_{7,10}$, Q_{90} , and Q_{10}), thereby translating climate projections into operational implications for water security.

Therefore, this research advances the state of knowledge by employing a larger ensemble of CMIP6 models from the NEX-GDDP collection and by incorporating the SSP245 and SSP585 scenarios. It is guided by the following research question: How will projected climate changes under SSP245 and SSP585 scenarios affect water availability in the Paraopeba River Basin across different future time slices?

In this context, the purpose of this study was to evaluate the impact of climate change on water availability in the Paraopeba River Basin using the MHD-INPE model. For this purpose, seven climate models from the NEX-GDDP-CMIP6 collection and two SSP scenarios (SSP245 and SSP585) were selected. The climate models were evaluated for three time-slices: near future, mid-future, and end of the century. The results contribute not only to advancing hydrological modeling applications under CMIP6 but also to supporting adaptive planning strategies aimed at preventing future water supply crises in one of Brazil's most socioeconomically relevant basins. Beyond its regional relevance, the integrated CMIP6–MHD-INPE framework proposed here is transferable to other basins, contributing to global efforts aligned with Sustainable Development Goals 6 (Clean Water and Sanitation) and 13 (Climate Action) by supporting sustainable water allocation and climate adaptation planning.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area Description

The Paraopeba River basin (Figure 1), one of the main tributaries of the São Francisco River, rises in the municipality of Cristiano Ottoni and runs approximately 510 km to its mouth at the Três Marias reservoir in Felixlândia. The basin covers 48 municipalities across an area of 12,500 km².

One of the most important sources of water supply is the Paraopeba system, composed of three reservoirs: Rio Manso, Serra Azul, and Vargem das Flores, which is responsible for supplying the Belo Horizonte metropolitan region, which corresponds to approximately 3.5 million people [6,13,14,20,21]. The basin has a variety of economic activities, such as industrial centers (steel, textile, food, automotive, petrochemical, etc.), mining, hydroelectric plants, and large urban centers of economic and cultural relevance [10–12] and is divided into three sub-basins: Upper Paraopeba, Middle Paraopeba, and Lower Paraopeba. Mining activities, which are extensive in the basin, can change natural drainage patterns, affecting both water quality and flow regimes. Agricultural expansion intensifies water withdrawals for irrigation and, due to land use changes, contributes to reduced baseflow during dry periods. Hydropower generation depends directly on streamflow regulation, influencing reservoir operations and downstream discharge patterns. The combined pressures of these users amplify the basin's vulnerability to climate changes, reinforcing the need for integrated hydrological assessments that explicitly account for the cumulative impacts of economic activities on water availability and security on a sub basin level.

Agricultural activities predominate in the Upper and Middle Paraopeba, with production mainly supplying the metropolitan region of Belo Horizonte [21,22]. Mining activities are more concentrated in the Middle Paraopeba, followed by the Lower and Upper Paraopeba, with emphasis on the production of fine aggregates for civil construction, ornamental stones, and iron ore [10,22].

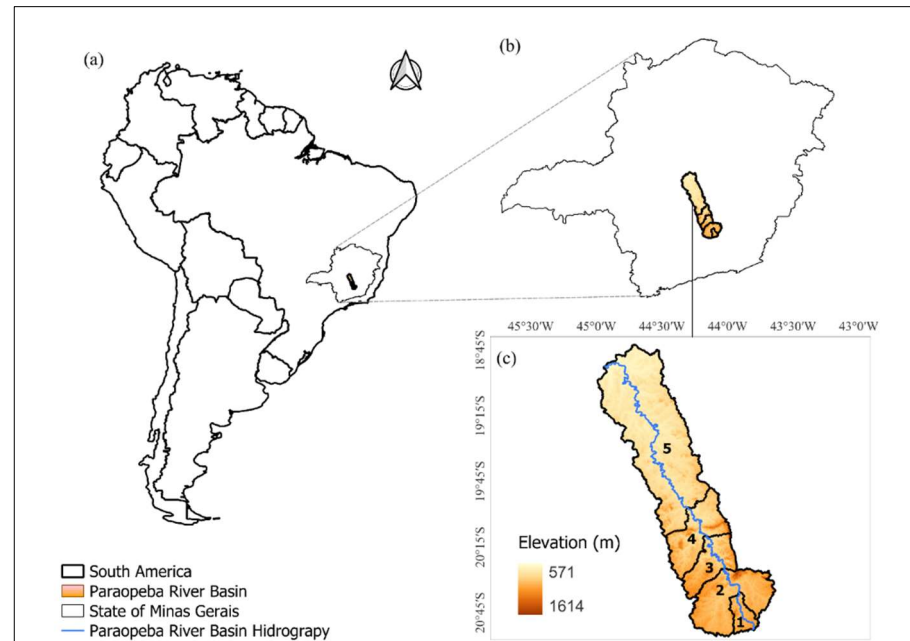


Figure 1. Location of the Paraopeba River Basin. (a) Location in South America; (b) Location in the state of Minas Gerais; (c) Detail of the Paraopeba River Basin, with the location of hydrometric stations and respective sub-basins.

Electricity production in the PRB occurs through the Retiro Baixo hydroelectric plants, with a production capacity of 82.00 MW. There is also a thermoelectric plant in Igarapé [23].

The average annual rainfall in the PRB is 1700 mm in the headwaters and 1150 mm in the region near the mouth. According to the Köppen climate classification, the basin has three climate types: Cwb, Cwa, and Aw [11,24]. The Cwb type is predominant, covering about 62.50% of the municipalities, followed by Cwa and Aw with 35.42% and 2.08%, respectively.

2.2. Distributed Hydrological Model of the National Institute for Space Research (MHD-INPE)

The hydrological simulations for future scenarios were performed using the Distributed Hydrological Model of the National Institute for Space Research (MHD-INPE). This model is a regular grid distributed model [25], which seamlessly integrates land use and land cover changes and climate scenarios, making it suitable for the application of this study.

The runoff generation and flow separation processes in the MHD-INPE are modeled by integrating concepts of probabilistic distribution of storage capacity, as used in the Xinanjiang model [26], along with the principles adopted in TopModel [26]. The methodologies establish a correlation between the hydrological response of the basin and the self-organization patterns observed on a large scale.

The input data required for the calibration and validation stages of the hydrological model include spatial topographic information, rainfall and river flow data, soil class, land use and cover, and meteorological data [13,25].

For the Paraopeba River Basin, the cells were discretized at approximately 5 km. The warm-up period covered 1986 to 1987, and calibration and validation were conducted for

the periods 1996 to 2018 and from 1988 to 1995, respectively, using daily discharges. For the Retiro Baixo Montante, the warm-up, calibration, and validation periods correspond to 2011 to 2012, 2015 to 2018, and 2013 to 2014, respectively. Considering the statistics indices average values for the five sub-basins, calibration results showed NSE (Nash–Sutcliffe Efficiency), LNSE (Logarithmic Nash–Sutcliffe Efficiency), KGE (Kling–Gupta Efficiency), R^2 (Coefficient of Determination), and PBIAS (Percent Bias) of 0.81, 0.85, 0.84, 0.82, and -6.50% , respectively. During validation, the corresponding values were 0.76, 0.75, 0.72, 0.82, and 9.35% . These results indicate satisfactory overall model performance. The calibration was performed based on the parameters suggested by [13] with daily data. Additional details are provided in the referenced study.

To simulate future scenarios, it is necessary to have precipitation and meteorological data, which consists of five variables: air temperature, dew point temperature, wind speed, solar radiation, and atmospheric pressure [26].

Climate change projections and future scenarios were obtained from the NEX-GDDP-CMIP6 (NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections) dataset, released in 2022, which provides outputs from 35 global models from CMIP6 [27]. This database already presents bias correction, based on the Bias-Correction Spatial Disaggregation (BCSD) method, and allows for higher-resolution analyses that account for the effects of local topography on climate processes [28]. The NEX-GDDP-CMIP6 database provides historical daily data for the period 1950–2014, as well as future projections based on the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) for the period 2015–2100, with a spatial resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ and referenced to the WGS 84 datum [28,29]. It is important to highlight that this grid was subsequently interpolated to the basin grid.

In this study, seven of the 35 available climate models from the NEX-GDDP-CMIP6 collection were selected based on the evaluation performed by [6], which assessed the performance of CMIP6 climate models in the Paraopeba River Basin. The assessment conducted by [6] consisted of an analysis of the performance of 17 models derived from the NEX-GDDP-CMIP6 collection, focusing on simulated precipitation due to the additional uncertainty associated with precipitation projections in Global Circulation Models. The seven best-performing climate models were then selected. Model performance was evaluated against observed precipitation data from the BR-DWGD grid using statistical metrics, which enabled the calculation of the Pielke index. The baseline climate was characterized using data from 1992 to 2014. Future projections were evaluated for the periods 2040–2060 (near future), 2061–2080 (mid-future), and 2081–2100 (end of the century). For analysis, the scenarios selected were SSP245 (trend scenario) and SSP585 (pessimistic scenario).

The SSP245 and SSP585 scenarios were selected due to their contrasting trajectories, which allow changes to be assessed considering different levels of radiative forces and socioeconomic development patterns. The SSP245 scenario corresponds to average emissions (intermediate scenario), representing the “middle of the road, in which no significant improvements are observed in relation to historical patterns [6,28,30]. In comparison, the SSP585 scenario represents a society that is highly driven and impacted using fossil fuels, which have a greater impact on climate change [31,32]. The schematic representation of the data and projections used in this study is shown in Figure 2.

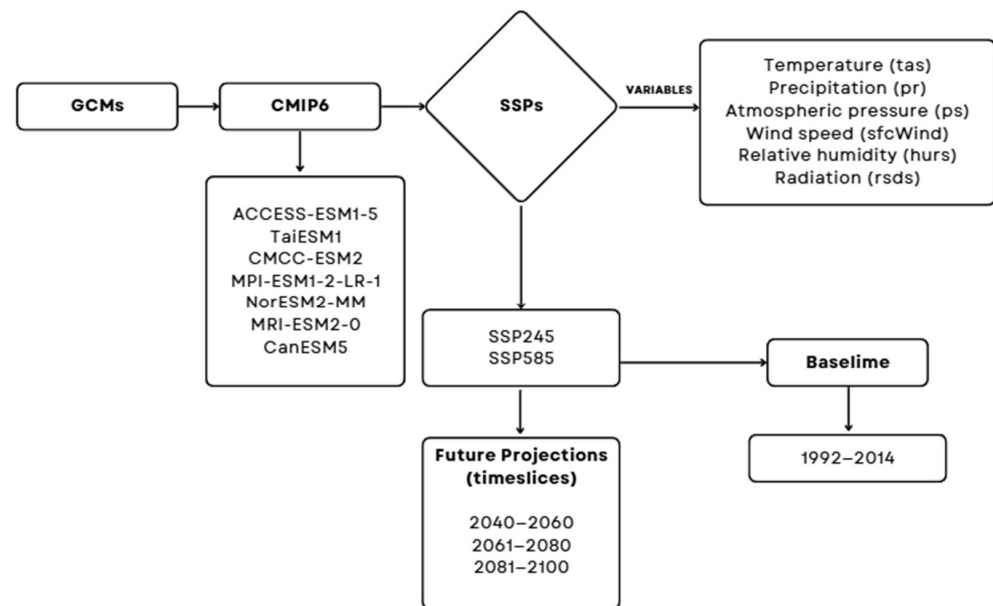


Figure 2. Schematic representation of the data input and meteorological variables used in the MHD-INPE.

2.3. Assessment of the Impacts of Climate Changes

Under baseline scenario, the Q_{10} and Q_{90} streamflow percentiles, which is the streamflow exceeded by 10% and 90% of the time, respectively, were evaluated during the validation of simulated streamflow. Q_{10} reflects high streamflow conditions and may be related to flood potential, while Q_{90} represents streamflow conditions and is associated with drought risk and directly related to ecological flows, consumptive water uses, and hydropower. Changes in these indicators provide information on the intensification of hydrological extremes and the vulnerability of the basin in future climate scenarios.

In addition, for the future projections, $Q_{7,10}$ was also evaluated for the PRB, which, according to IGAM Ordinance No. 48, dated 4 October 2019, Minas Gerais, constitutes the reference low-flow metric adopted in the state of Minas Gerais and represents a highly restrictive hydrological condition.

According to data provided by IGAM for the Paraopeba River Basin, in 2023 there were currently 555 surface water abstraction permits, of which 82% correspond to consumptive uses and 18% to non-consumptive uses. The main authorized water uses include irrigation, human consumption, public water supply, livestock watering, industrial use, mining, and other minor uses.

To calculate $Q_{7,10}$ values for observed and simulated streamflow data, a probabilistic fit to the Gumbel distribution was carried out, considering annual mean minimum streamflow over seven consecutive days and accounting for three time-slices (2040–2060, 2061–2080, and 2081–2100), which represent the near future, mid-future and end-of-century periods, respectively. The goodness-of-fit of the series was assessed using the Kolmogorov–Smirnov test, adopting a significance level of 0.05.

The conflict index I_{cg} (Equation (1), proposed by [33] was also evaluated). This index evaluated whether the streamflows water permits upstream of the control section exceed the limits set by the legislation If the ($I_{cg} > 1$) or are within legal limits ($0 \leq I_{cg} \leq 1$). The I_{cg} is calculated based on two variables: authorized water uses and $Q_{7,10}$ streamflows. For this calculation, the currently authorized water uses in the five sub-basins, as presented by [13], and $Q_{7,10}$ in future scenarios were considered.

$$I_{cg} = \frac{Q_{out}}{0.30 \times Q_{7,10}} \quad (1)$$

where:

Q_{out} granted water withdrawals, (m^3/s),

$Q_{7,10}$, streamflow rate (m^3/s) established by IGAM Ordinance No. 48, of 4 October 2019 [32].

It is important to highlight that the use of 30% of the reference streamflow ($Q_{7,10}$) is justified since, in the state of Minas Gerais, where the study basin is located, the authorized water concession for use corresponds to 30% of $Q_{7,10}$.

For the streamflows simulated by the MHD-INPE under future projections, statistical descriptors were also applied, including MWH (hydrological response to high-flow conditions, considering streamflows with a probability of exceedance lower than 5%), MWL (hydrological response to low-flow conditions, considering flows with a probability of exceedance greater than 95%), QSM (which represents the average variability of flow coefficients), and SEASON (which describes flow seasonality). These descriptors are presented in Equations (2)–(4).

$$MWH = \frac{\sum_{h=1}^H Q_h}{H} \quad (2)$$

$$MWL = \frac{\sum_{l=1}^L Q_l}{L} \quad (3)$$

$$QSM = \frac{Q_{0.8} - Q_{0.2}}{\underline{Q}} \quad (4)$$

$$SEASON = \frac{Q_{rainy} - Q_{dry}}{\underline{Q}} \quad (5)$$

where:

Q_h , flow rate (m^3/s) with a probability of exceedance $<5\%$;

Q_l , flow rate (m^3/s) with a probability of exceedance $>95\%$;

H and L , data in the respective interval;

$Q_{0.8}$, flow rate (m^3/s) for the 0.8 quantile;

$Q_{0.2}$, flow rate (m^3/s) for the 0.2 quantile;

$\underline{Q}$, average flow rate for the entire period;

Q_{rainy} , average between the flow rate for the rainy periods;

Q_{dry} , average between the flow rate for the dry periods.

3. Results

Simulated Streamflow in the Baseline Scenario

The observed and simulated streamflows from the ensemble of models (ACCESS-ESM1-5, TaiESM1, CMCC-ESM2, MPI-ESM1-2-LR-1, NorESM2-MM, MRI-ESM2-0, and CanESM5) are presented in the streamflow duration curve (Figure 3), for the baseline scenario (1992–2014).

In general, the results show a good fit between the observed and simulated daily streamflows, indicating that the ensemble of climate models satisfactorily represents the hydrological behavior of each sub-basin. However, as expected, the greatest difficulties in the simulations are for minimum and maximum streamflows. It is observed that the greatest tendency to overestimate Q_{10} and Q_{90} is evident in sub-basins 1 and 2 (Table 1). This overestimation can be attributed to the cascade of uncertainties associated with hydrological processes. It is important to highlight that sub-basins 1 and 2 have small drainage areas and are in headwater regions, which increases their sensitivity to spatial and temporal

variability in precipitation. Therefore, in addition to the uncertainties inherent to the atmospheric processes represented by climate models on a coarser spatial scale, there are also limitations related to the physical representation of these sub-basins, which may not adequately capture climate variability at the local scale.

Table 1. Q_{10} , Q_{50} and Q_{90} and relative differences in simulated and observed streamflows in sub-basins 1 to 5. Overestimates and underestimates of simulated streamflow in %.

Sub-Basin	Q_{10} (m ³ /s)			Q_{50}			Q_{90}		
	Sim.	Obs.	Dif. %	Sim.	Obs.	Dif. %	Sim.	Obs.	Dif. %
1	15.74	13.42	17%	6.02	4.85	24%	3.08	2.25	37%
2	111.20	91.34	22%	37.97	29.19	30%	15.38	13.42	15%
3	118.05	117.11	1%	44.28	39.24	13%	20.20	19.26	5%
4	165.50	165.46	0%	54.22	51.94	4%	23.23	24.65	−6%
5	212.26	217.40	−2%	79.20	69.36	14%	34.14	29.47	16%

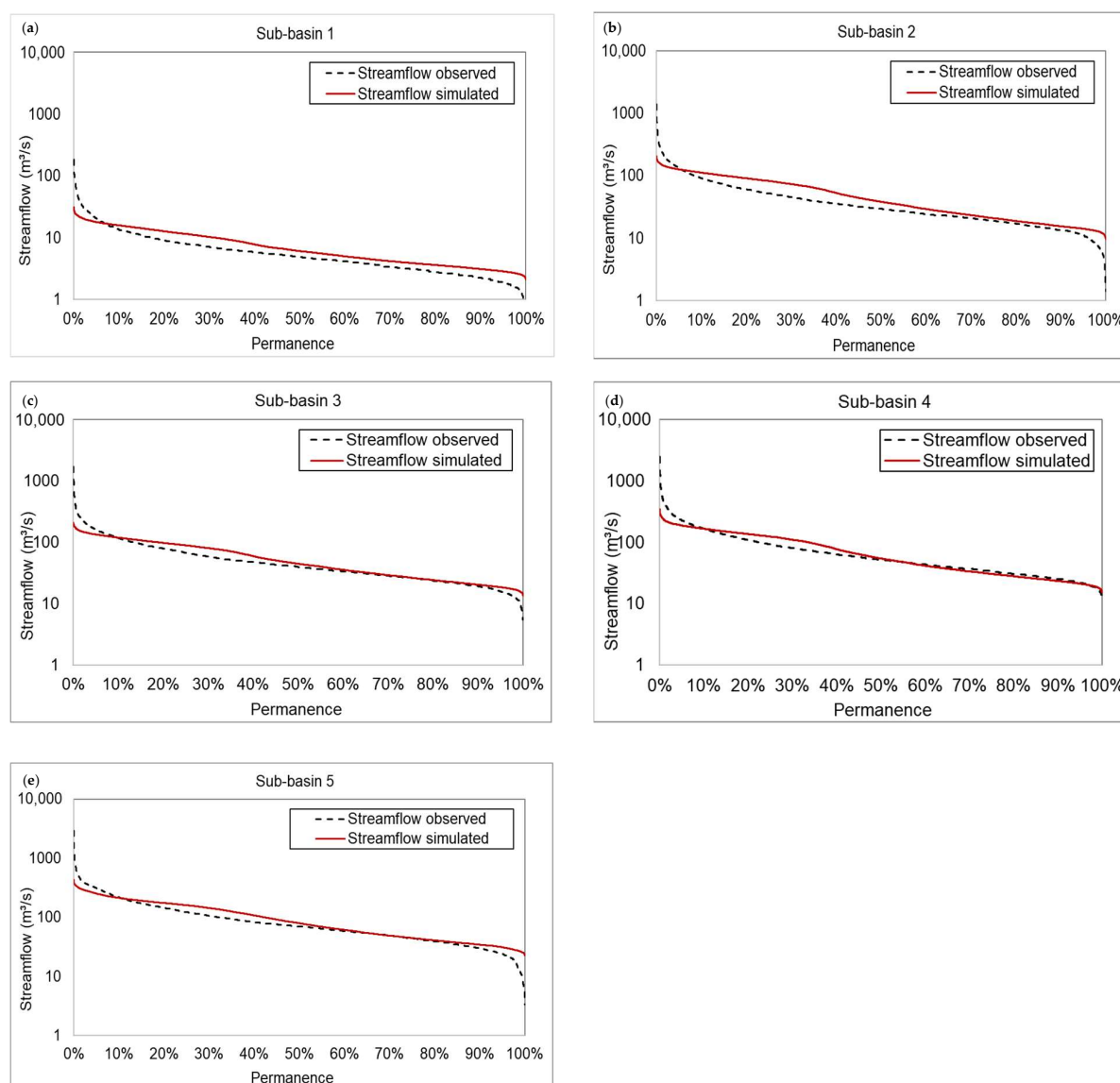


Figure 3. Streamflow duration curve of simulated flows considering the streamflow observed and simulated in each sub-basin. (a) Sub-basin 1. (b) Sub-basin 2. (c) Sub-basin 3. (d) Sub-basin 4. (e) Sub-basin 5.

It is important to highlight that, according to [17], discharge extremes must be evaluated with caution when assessing future scenarios. Climate models still exhibit uncertainties inherent to climate processes, due to the dynamic nature of the atmosphere [17,34]. Additionally, ref. [35] emphasizes that uncertainties in the coupling of climate projections and hydrological models may be associated with the complexity of natural systems, the simplification of hydrological processes, and model parameterization, among other factors. Ref. [13] also reports difficulties in accurately adjusting extreme streamflows, which may be related to the extrapolations required in MHD-INPE simulations. These difficulties occur due to precipitation network data, which is generally sparse at headwaters where altitude ranges are higher, affecting the spatial distribution of rainfall mainly from extreme events; and extrapolation of the rating curve especially for high flows.

Given that the ensemble of models demonstrated a good fit between the permanence curve of observed daily streamflows and simulated streamflows (Table 1 and Figure 3), the behavior of streamflows in future scenarios in each sub-basin was subsequently evaluated. Overall, the flow permanence curves reveal significant changes, mainly at the extremes, in the SSP245 and SSP585 scenarios in the sub-basins considered in this study (Figure 4).

When analyzing the three time slices, the results indicate that the most pronounced changes in water availability are associated with the SSP585 scenario, particularly toward the end of the century (2081–2100). The most significant hydrological variability was observed in sub-basins 4 and 5 (Figure 4g–j). In sub-basin 4 an increase in maximum streamflows (Q_{10}) is projected, particularly under the SSP585 scenario, with increases of 10.3% and 11.7%, relative to the near-future period and the end of the century, respectively. Reductions in Q_{90} were also identified, becoming more pronounced toward the end of the century, with declines exceeding 20% in both scenarios. In sub-basin 5, Q_{90} reductions reach nearly 30% by the end of the century under the SSP585 scenario.

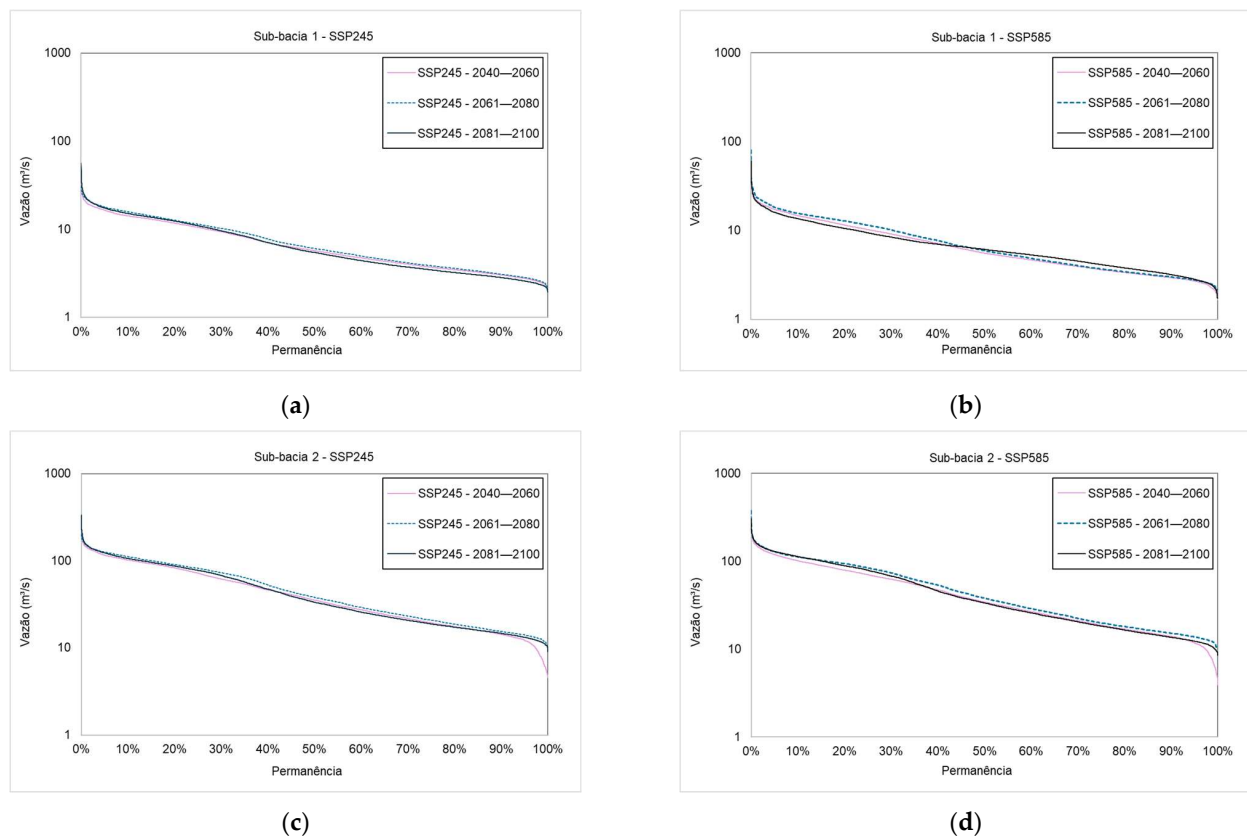


Figure 4. Cont.

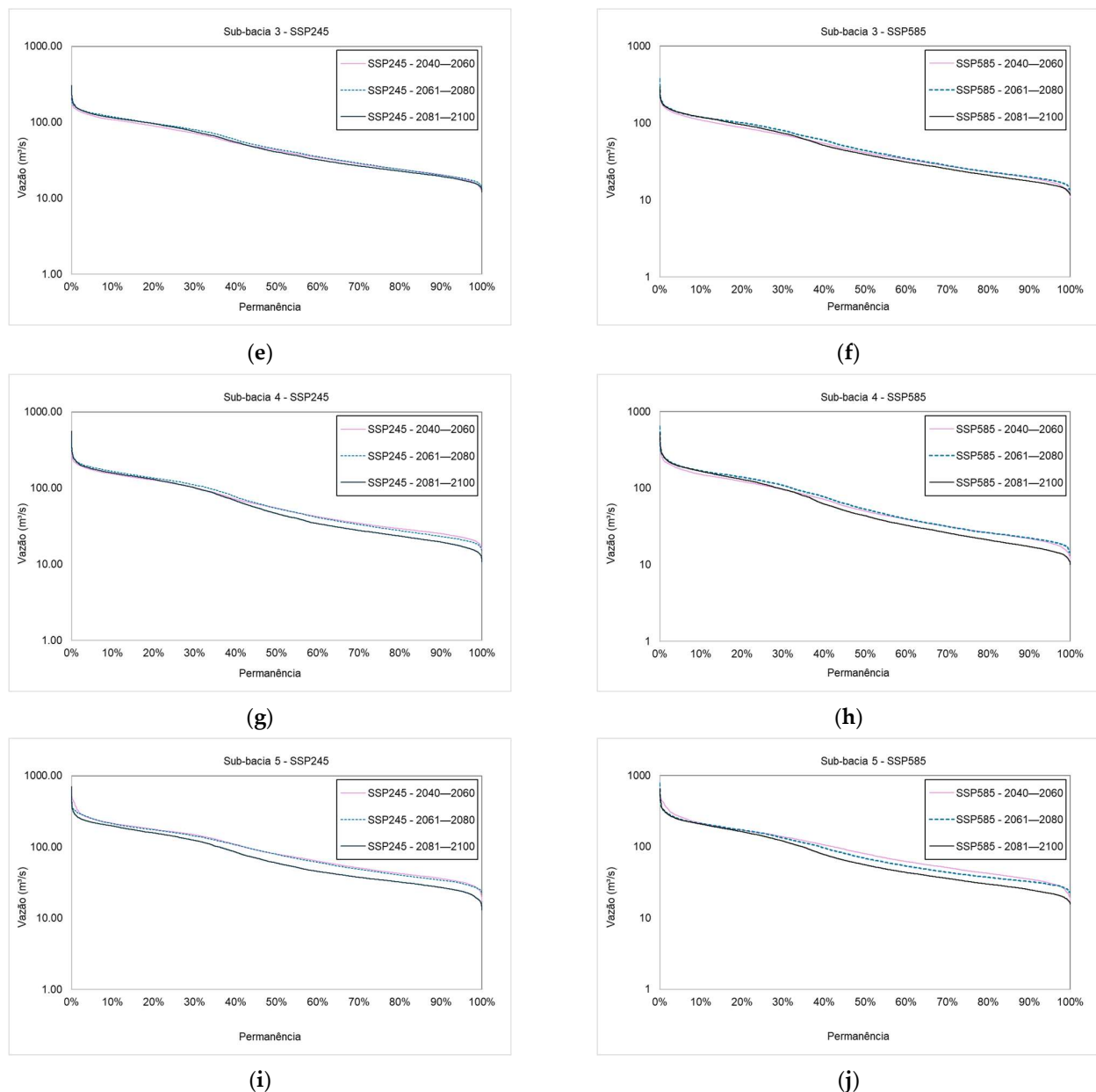


Figure 4. Streamflow duration curve of simulated flows considering the SSP245 and SSP585 scenarios. (a) Sub-basin 1 under SSP245 scenario. (b) Sub-basin 1 under SSP585 scenario. (c) Sub-basin 2 under SSP245 scenario. (d) Sub-basin 2 under SSP585 scenario. (e) Sub-basin 3 under SSP245 scenario. (f) Sub-basin 3 under SSP585 scenario. (g) Sub-basin 4 under SSP245 scenario. (h) Sub-basin 4 under SSP585 scenario. (i) Sub-basin 5 under SSP245 scenario. (j) Sub-basin 5 under SSP585 scenario.

In addition to the analysis, Table 2 shows the results of $Q_{7,10}$ for the future scenarios in each sub-basin. Except for sub-basin 1 (during the mid-future and end of the century) and sub-basin 5 (during the mid-future), reductions in $Q_{7,10}$ were observed in the remaining sub-basins under the SSP585 scenario when compared to SSP245.

The Conflict Index (I_{cg}) is presented in Figure 5. As shown in this figure, except for sub-basin 1, the results for future scenarios indicate that the granted water withdrawals tend to exceed the maximum limits of $Q_{7,10}$. It is worth noting that the risk of water-use conflicts becomes more pronounced in sub-basins 4 and 5, with the most critical impacts projected for the end of the century. Under current basin conditions, difficulties in maintaining the granted streamflows have already been identified, as reported by [13]. Therefore, under

future climate scenarios, an intensification of water-use conflicts is expected, potentially compromising basin water security and the sustainability of existing water uses.

Table 2. $Q_{7,10}$ for the future scenarios in each sub-basin.

Sub-Basin	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	
	SSP245	SSP585
2040–2060		
1	2.28	2.09
2	8.90	8.46
3	14.23	12.73
4	17.86	13.74
5	20.85	19.00
2061–2080		
1	2.35	2.35
2	11.42	11.46
3	15.21	15.13
4	16.99	16.45
5	21.16	24.48
2081–2100		
1	2.18	2.21
2	10.72	9.70
3	14.24	12.66
4	13.37	11.56
5	18.07	17.02

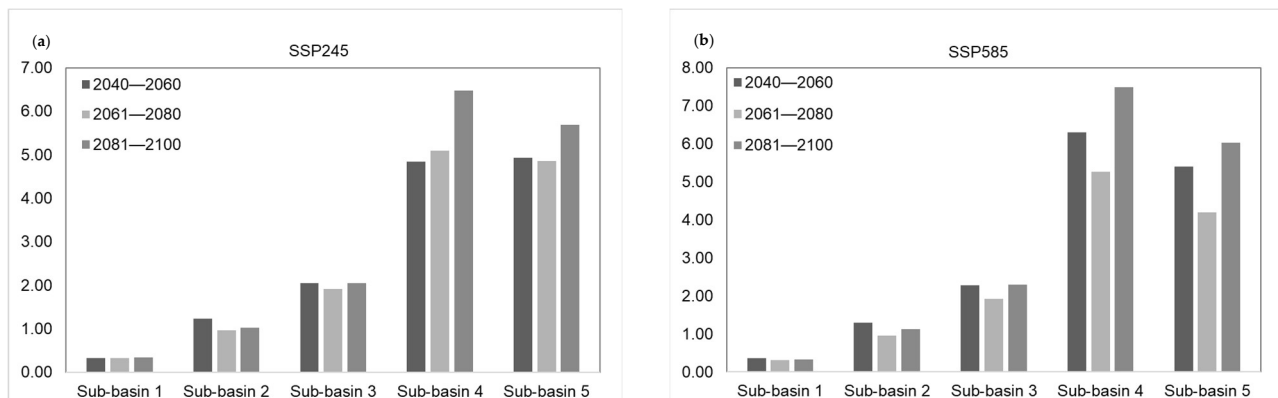


Figure 5. The conflict Index (Icg) for future scenarios in each sub-basin. (a) Icg under SSP245 scenario. (b) Icg under SSP585 scenario.

Figure 6 presents the statistical descriptors (QSM, SEASON, MWH and MWL) of the streamflow duration curve in each sub-basin. Regarding seasonality (SEASON), which shows the effects of differences in streamflow in the dry and rainy seasons, there is a reduction in all scenarios evaluated, especially in the mid-future. This decrease indicates an intensification of streamflow seasonality, characterized by a stronger temporal concentration of flows within specific periods of the year.

The QSM represents the average segment of the streamflow duration curve [36] and reflects intraseasonal variability. The projected variation of the QSM initially shows a slight increase in the first time windows, possibly associated with the intensification of significant rainfall events or the increase in seasonal recharge; however, at the end of the century, especially under the SSP585 scenario, a significant reduction is observed in

sub-basins 1 and 2, suggesting that the increase in temperature and the consequent increase in evapotranspiration outweigh any gains in precipitation.

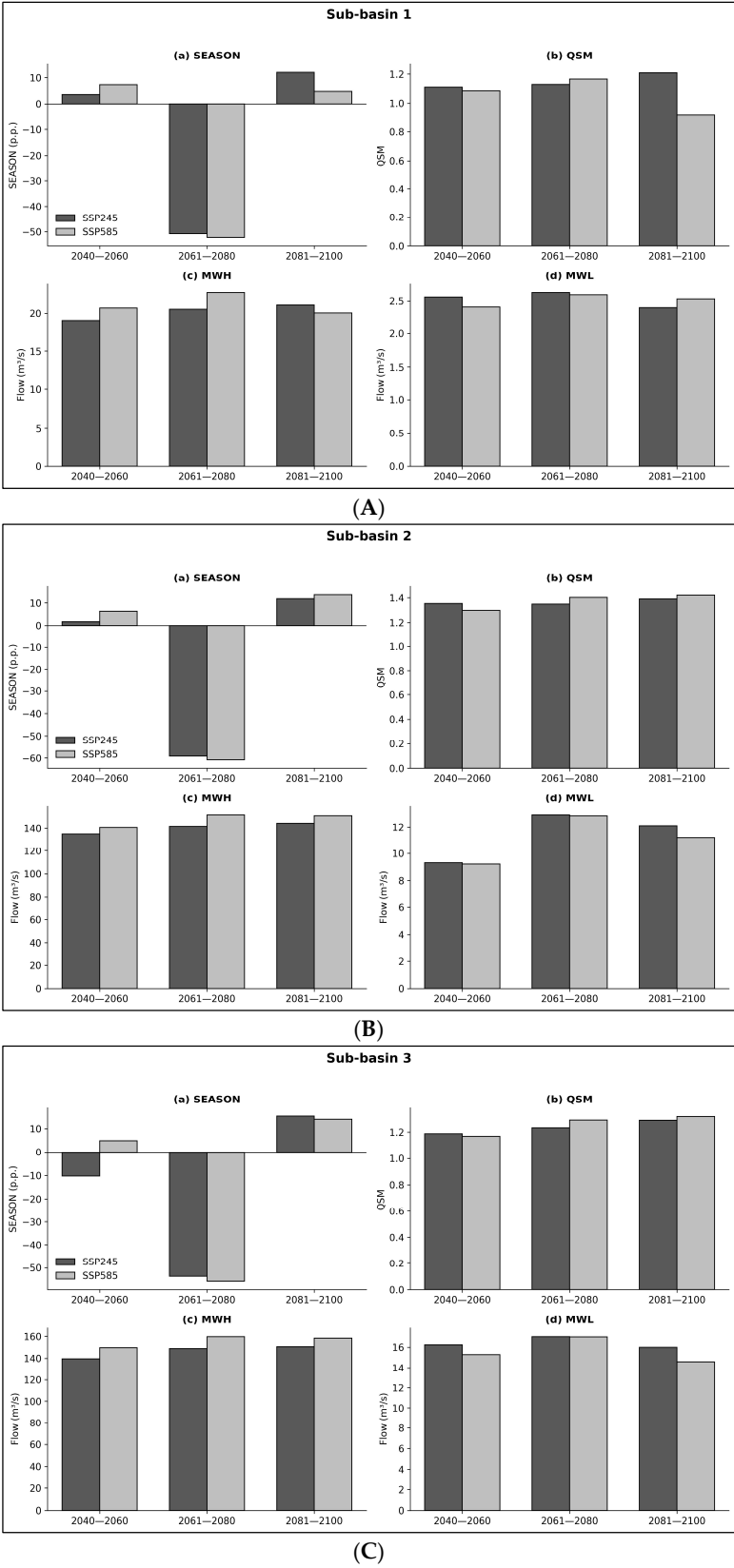


Figure 6. Cont.

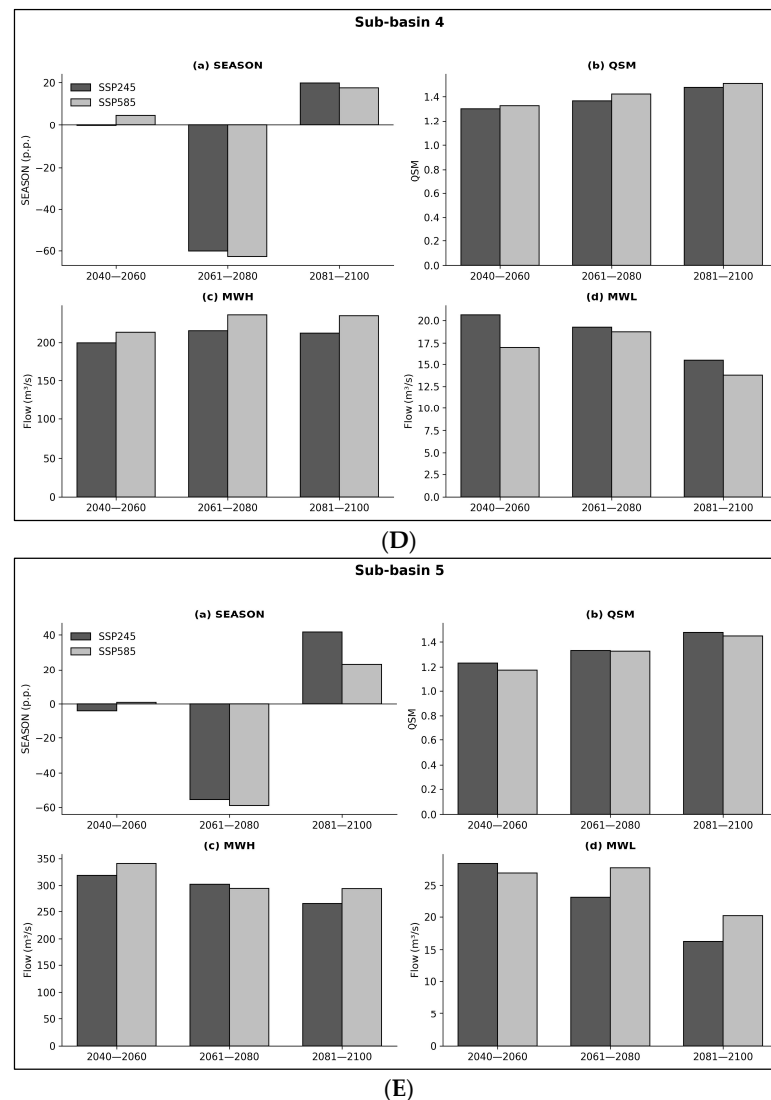


Figure 6. Statistical descriptors (SEASON, SQM, MWH and MWL) of the streamflow duration curve in each sub-basin. (A) SEASON, SQM, MWH and MWL—Sub-basin 1. (B) SEASON, SQM, MWH and MWL—Sub-basin 2. (C) SEASON, SQM, MWH and MWL—Sub-basin 3. (D) SEASON, SQM, MWH and MWL—Sub-basin 4. (E) SEASON, SQM, MWH and MWL—Sub-basin 5.

The MWH (Figure 6C) and MWL (Figure 6D) indicators represent, respectively, the average flood and drought streamflows. In most sub-basins, there is an increase in the average maximum streamflows, which may indicate an increase in the occurrence of large flood events. On the other hand, the MWL indicates a decrease in the average minimum streamflows, which may compromise the maintenance of base runoff, affecting the recharge of aquifers, especially towards the end of the century.

Given that the ensemble of models demonstrated an adequate agreement between the flow duration curve of observed daily streamflows and simulated streamflows (Table 1 and Figure 3), the behavior of streamflows in future scenarios in each sub-basin was subsequently evaluated. Overall, streamflow duration curves reveal significant changes, mainly at the extremes, in the SSP245 and SSP585 scenarios in the sub-basins considered in this study (Figure 4).

4. Discussion

The projected increase in Q_{10} combined with the reduction in Q_{90} and $Q_{7,10}$ indicates a trend toward amplification of hydrological extremes. This pattern suggests an increase in

maximum streamflow and a reduction in minimum streamflow. This behavior suggests changes in the seasonal distribution of precipitation, leading to more intense flooding events and more severe droughts. This interpretation is consistent with the findings of [17], who assessed the impacts of climate change on mining regions in the state of Minas Gerais. According to their study, climate extremes are expected to intensify, particularly under the high-emission scenario [1,6].

The reduction in SEASON and MWL, together with the increase in MWH, reflects a redistribution of streamflow associated with changes in precipitation patterns and atmospheric demand. Under projected climate conditions, rainfall tends to occur in fewer but more intense events, increasing surface runoff as precipitation intensity more frequently exceeds soil infiltration capacity, thereby amplifying peak flows (MWH and Q_{10}). Simultaneously, longer dry periods combined with higher temperatures enhance evapotranspiration and reduce groundwater recharge, leading to diminished baseflow contributions and lower MWL and Q_{90} values. Similar mechanisms have been discussed by [4,12], who emphasize that increased atmospheric demand and rainfall variability play a central role in altering runoff regimes under climate change.

The stronger responses observed in sub-basins 4 and 5 may be associated with their hydrological and geomorphological characteristics, as well as higher water demand pressures. Land uses in these sub-basins tend to reduce infiltration capacity and increase surface runoff, amplifying peak flows during intense rainfall events while simultaneously reducing groundwater recharge and baseflow contributions during dry periods [10,12].

Estimation of $Q_{7,10}$ was based on a stationary Gumbel distribution fitted to annual minimum streamflow. The results are interpreted within the framework of conditional stationarity for each time-slice. In other words, although long-term climate change may induce nonstationary behavior over the entire projection horizon [17,35], the changes within each selected period are considered sufficiently gradual that the statistical properties of annual minimum flows can be approximated as stationary. This approach is commonly applied in multi-decadal periods and assumes a condition of pseudo-stationarity within each slice in climate conditions.

It should also be recognized that the assessment of future water use conflicts was conducted, assuming unchanged overtime water permits, based on current conditions. This assumption represents a limitation of the study. Additionally, the climate projections were derived from the NEX-GDDP-CMIP6 dataset using the Bias-Correction Spatial Disaggregation (BCSD) method. Although BCSD improves the statistical agreement between modeled and observed historical climate, it assumes that bias structures remain constant over time and may not fully capture changes in the frequency and intensity of extreme events [27,29]. Moreover, the interpolation of the $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ climate grids to the basin discretization can introduce spatial smoothing effects, particularly in regions with complex topography, potentially affecting the simulated hydrological response.

5. Conclusions

The results demonstrate that projected climate changes under the SSP scenarios are likely to substantially modify the hydrological regime of the Paraopeba River Basin. The ensemble of CMIP6 models coupled with the MHD-INPE model consistently indicates reductions in minimum streamflow and increases in maximum streamflow, particularly under the high-emission SSP585 scenario toward the end of the century. The most pronounced impacts were identified in sub-basins 4 and 5, where Q_{90} reductions approach 30% and Q_{10} increases reach up to 11.7%, evidencing a clear intensification of hydrological extremes.

This shift in the flow regime suggests a growing frequency of intense flood events combined with increased susceptibility to prolonged drought periods. The projected reductions

in $Q_{7,10}$ (the reference low streamflow metric adopted for water allocation in Minas Gerais), reinforce concerns regarding the sustainability of currently granted water withdrawals. The elevated values of the Conflict Index (Icg), especially in sub-basins 4 and 5, indicate that water use conflicts may intensify under future climate conditions potentially compromising regional water security.

Beyond extreme flows, the study reveals structural changes in the basin's hydrological dynamics. Reductions in seasonality (SEASON), decreases in low-flow indicators (MWL), and increases in high-flow indicators (MWH) collectively point to a more irregular and temporally concentrated flow regime. These alterations are likely associated with more concentrated precipitation events and increased evapotranspiration rates under warmer conditions. Such modifications affect not only the magnitude of water availability but also the reliability and predictability of the hydrological system, which are critical for the planning and operation of water supply systems, irrigation schemes, industrial uses, and hydropower generation, posing additional challenges to water managers.

From a water management perspective, the findings underscore the urgent need to incorporate climate change projections into water resources planning and regulatory frameworks in the Paraopeba River Basin. The projected changes call for adaptive and risk-informed management strategies, including periodic reassessment of water allocation criteria, revision of water use permits based on hydrological risk indicators, strengthening of hydrometeorological monitoring networks, integration between water resources management and land-use planning, and the promotion of ecosystem restoration and conservation measures to enhance basin resilience.

Considering the limitations of this study, it can be concluded that the projections are subject to uncertainties related to climate model structure, scenario spread among SSPs, and assumptions within the hydrological modeling framework. Although these factors influence the magnitude of projected impacts, the overall trend toward intensified hydrological extremes and increased allocation stress remains consistent across models and scenarios.

Author Contributions: Conceptualization, C.M.d.A. and L.A.A.; methodology, C.M.d.A., L.A.A., P.A.M., J.T. and P.R.F.P.; validation, C.M.d.A. and L.A.A.; formal analysis, C.M.d.A., L.A.A., P.A.M., C.R.d.M., J.M.G.P.I. and J.T.; investigation, C.M.d.A. and L.A.A.; writing—original draft preparation C.M.d.A., L.A.A., P.A.M., J.T., J.M.G.P.I. and P.R.F.P.; writing—review and editing, C.M.d.A., L.A.A., P.A.M., J.T., C.R.d.M., J.M.G.P.I. and P.R.F.P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was supported by the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) [Grant number APQ-00709-21], Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [Grant number 305295/2021-7] and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [Grant number 305711/2024-5]. Author Jorge M. G. P. Isidoro was funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) through projects UIDB/00350/2025 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/00350/2020>) granted to Marine and Environmental Sciences Centre (CIMA), University of Algarve (Portugal), and the LA/P/0069/2020 (<https://doi.org/10.54499/LA/P/0069/2020>) granted to the Associate Laboratory Aquatic Research Network (ARNET).

Data Availability Statement: The original contributions presented in this study are included in the article. Further inquiries can be directed to the corresponding author.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
GCM	Global Climate Models
SSPs	Shared Socioeconomic Pathways

References

- Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability | Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Available online: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (accessed on 27 December 2025).
- Copernicus: 2024 Is the First Year to Exceed 1.5 °C above Pre-Industrial Level | Copernicus. Available online: <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level> (accessed on 27 December 2025).
- Bevacqua, E.; Schleussner, C.F.; Zscheischler, J. A Year above 1.5 °C Signals That Earth Is Most Probably within the 20-Year Period That Will Reach the Paris Agreement Limit. *Nat. Clim. Change* **2025**, *15*, 262–265. [\[CrossRef\]](#)
- Melo, P.A.; Alvarenga, L.A.; Tomasella, J.; de Mello, C.R.; Martins, M.A.; Coelho, G. Analysis of Hydrological Impacts Caused by Climatic and Anthropogenic Changes in Upper Grande River Basin, Brazil. *Environ. Earth Sci.* **2022**, *81*, 504. [\[CrossRef\]](#)
- Medeiros, F.J.; Oliveira, C.P.; Avila-Diaz, A. Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: From CMIP3 to CMIP6. *Weather Clim. Extrem.* **2022**, *38*, 100511. [\[CrossRef\]](#)
- de Alvarenga, C.M.; Alvarenga, L.A.; Melo, P.A.; Tomasella, J.; Pinto, P.R.F.; de Mello, C.R. Meteorological Droughts in the Paraopeba River Basin: Current Scenarios and Future Projections. *Land* **2025**, *14*, 2093. [\[CrossRef\]](#)
- Lee, H.; Calvin, K.; Dasgupta, D.; Krinner, G.; Mukherji, A.; Thorne, P.; Trisos, C.; Romero, J.; Aldunce, P.; Ruane, A.C. Summary for Policymakers. In *Climate Change 2023: Synthesis Report*; Intergovernmental Panel on Climate Change: Geneva, Switzerland, 2023; Volume 186.
- Ribeiro, L.D.C.; Paiva, R.C.D.D.; Collischonn, W.; Fagundes, H.D.O.; Kolling Neto, A.; Miranda, P.T.; Rossi, J.B.; Fernandez, G.M.R.; Araujo, A.A.; Souza, S.A.D. AVANÇOS NA COMPREENSÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E VAZÕES EXTREMAS NO BRASIL. In *Encontro Nacional de Desastres*; ABRHidro: Porto Alegre, Brazil, 2023.
- Siqueira, P.P.; Oliveira, P.T.S.; Bressiani, D.; Meira Neto, A.A.; Rodrigues, D.B.B. Effects of Climate and Land Cover Changes on Water Availability in a Brazilian Cerrado Basin. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **2021**, *37*, 100931. [\[CrossRef\]](#)
- Barros da Silva, B.M.; Da Silva, D.D.; Moreira, M.C. Índices Para a Gestão e Planejamento de Recursos Hídricos Na Bacia Do Rio Paraopeba, Estado de Minas Gerais. *Rev. Ambiente Água* **2015**, *10*, 685–697. [\[CrossRef\]](#)
- Fonseca Durães, M.; Rogério De Mello, C. AVALIAÇÃO DO ESTRESSE HIDROLÓGICO NA BACIA DO RIO PARAPEBA-MG. In *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*; ABRHidro: Porto Alegre, Brazil, 2013.
- Soares, A.L.C.; Oliveira, S.C.; Gomes, L.N.L. Influência Das Atividades Antrópicas e Do Rompimento Da Barragem I, Da Mina Córrego Do Feijão, Na Qualidade Da Água Da Bacia Hidrográfica Do Rio Paraopeba. *Rev. Min. Recur. Hídricos* **2022**, *3*, e022004. [\[CrossRef\]](#)
- Pinto, P.R.F. *Segurança Hídrica Na Bacia Hidrográfica Do Rio Paraopeba*; FAO: Rome, Italy, 2024; Volume 89.
- Honorato, P.A.d.R.; Elmiro, M.A.T.; Nero, M.A.; Temba, P.d.C.; Jardim, H.L. A Contribuição Do Modelo FPEIR/TOPSIS No Diagnóstico Ambiental Da Segurança Hídrica de Áreas Atingidas Pela Barragem B1, Brumadinho, MG. *Soc. Nat.* **2025**, *37*, e74110. [\[CrossRef\]](#)
- Alvarenga, L.A.; Carvalho, V.S.O.; de Oliveira, V.A.; de Mello, C.R.; Colombo, A.; Tomasella, J.; Melo, P.A. Hydrological Simulation with SWAT and VIC Models in the Verde River Watershed, Minas Gerais. *Rev. Ambiente Água* **2020**, *15*, e2492. [\[CrossRef\]](#)
- Zákhia, E.M.S.; Alvarenga, L.A.; Tomasella, J.; Martins, M.A.; Santos, A.C.N.; Melo, P.A. Impactos Das Mudanças Climáticas Em Uma Bacia Hidrográfica No Sul Do Estado de Minas Gerais. *Rev. Bras. Meteorol.* **2021**, *36*, 667–681. [\[CrossRef\]](#)
- Melo, P.A.; Alvarenga, L.A.; Tomasella, J.; Santos, A.C.N. Uncertainty Analysis on Long-Term Runoff Projection from the Budyko Framework and a Conceptual Hydrological Model. *J. Water Clim. Change* **2024**, *15*, 3850–3866. [\[CrossRef\]](#)
- Costa, R.C.A.; Santos, R.M.B.; Fernandes, L.F.S.; Carvalho de Melo, M.; Valera, C.A.; do Valle Junior, R.F.; de Melo Silva, M.M.A.P.; Pacheco, F.A.L.; Pissarra, T.C.T. Hydrologic Response to Land Use and Land Cover Change Scenarios: An Example from the Paraopeba River Basin Based on the SWAT Model. *Water* **2023**, *15*, 1451. [\[CrossRef\]](#)
- da Silva, M.V.M.; Silveira, C.d.S.; Costa, J.M.F.d.; Martins, E.S.P.R.; Vasconcelos Júnior, F.d.C. Projection of Climate Change and Consumptive Demands Projections Impacts on Hydropower Generation in the São Francisco River Basin, Brazil. *Water* **2021**, *13*, 332. [\[CrossRef\]](#)
- PARAOPEBA—Sistema de Acompanhamento de Reservatórios. Available online: <https://www.ana.gov.br/sar/outros-sistemas-hidricos/paraopeba> (accessed on 3 January 2026).

21. De Vilhena, C.; Sabino, S.; Francisco De Abreu, J.; Lobato, W.; Sabino, G.S.; Aparecida, E.; Knup, N. Análise de Alguns Aspectos Da Qualidade Da Água Da Bacia Do Rio Paraopeba Utilizando Estatística Multivariada. *Rev. Biol. Ciências Terra* **2008**, *8*, 6–18.
22. Gonzaga de Oliveira Júnior, M.; Lacerda Maia, J.; Monteiro da Costa, A.; Paulo Oliveira Silva, J.; Junior, O. Disponibilidade Hídrica, Escassez e Cobrança de Recursos Hídricos Na Bacia Hidrográfica Do Rio Paraopeba, MG. *Rev. Ibero-Am. Ciências Ambient.* **2022**, *13*, 262–278. [\[CrossRef\]](#)
23. Pereira, A.H. Impacto de Usinas Hidrelétricas e Rompimento de Barragem de Rejeitos Na Estrutura Genética Populacional de Peixes: Um Estudo Com Prochilodus Costatus No Rio Paraopeba. Ph.D. Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2021.
24. Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; De Moraes Gonçalves, J.L.; Sparovek, G. Köppen's Climate Classification Map for Brazil. *Meteorol. Z.* **2013**, *22*, 711–728. [\[CrossRef\]](#)
25. Rodriguez, D.A.; Tomasella, J. On the Ability of Large-Scale Hydrological Models to Simulate Land Use and Land Cover Change Impacts in Amazonian Basins. *Hydrol. Sci. J.* **2016**, *61*, 1831–1846. [\[CrossRef\]](#)
26. Negrão, A.C.; Camargo, C.P.; Rodriguez, D.A.; Giornes, E.d.O.; Pinto, G.L.N.; Tomasella, J.; de Siqueira Júnior, J.L.; Lopes, L.G.; do Prado, M.C.R. *Modelo Hidrológico Distribuído MHD-INPE: Manual de Implementação*; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE): São José dos Campos, Brazil, 2016. Available online: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.24.14.43/doc/publicacao> (accessed on 3 January 2026).
27. Zou, W.; Cao, S.; Tan, W. Evaluating NEX-GDDP-CMIP6 Performance in Complex Terrain for Forecasting Key Freezing Rain Factors. *Theor. Appl. Climatol.* **2024**, *155*, 9289–9304. [\[CrossRef\]](#)
28. de Paula Moura, M.; de Alvarenga, C.M.; Fontanella, J.P.C.; Pedroso, M.J.; da Costa, M.V.G.; de Oliveira, W.B.; Barros, V.R.; Neto, A.R. AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM REGIÕES DE MINERAÇÃO NO ESTADO DE MINAS GERAIS. In *XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*; ABRHidro: Porto Alegre, Brazil, 2023.
29. Jiang, F.; Wen, S.; Gao, M.; Zhu, A. Assessment of NEX-GDDP-CMIP6 Downscale Data in Simulating Extreme Precipitation over the Huai River Basin. *Atmosphere* **2023**, *14*, 1497. [\[CrossRef\]](#)
30. O'Neill, B.C.; Krieglner, E.; Ebi, K.L.; Kemp-Benedict, E.; Riahi, K.; Rothman, D.S.; van Ruijven, B.J.; van Vuuren, D.P.; Birkmann, J.; Kok, K.; et al. The Roads Ahead: Narratives for Shared Socioeconomic Pathways Describing World Futures in the 21st Century. *Glob. Environ. Change* **2017**, *42*, 169–180. [\[CrossRef\]](#)
31. Petrielli, G.P. Avaliação Georreferenciada Dos Impactos Das Mudanças Climáticas Na Produção de Cana-de-Açúcar No Brasil. Ph.D. Thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brazil, 2024. [\[CrossRef\]](#)
32. Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). *Portaria IGAM No 48, de 04 de Outubro de 2019*; IGAM: Belo Horizonte, Brazil, 2019.
33. de Farias, V.E.M.; Rodrigues, A.B.; Monteiro, P.B.C.L.; Araujo, D.C.d.S.; Montenegro, S.M.G.L.; Cabral, J.J.d.S.P. PERSPECTIVAS CLIMÁTICAS FUTURAS COM BASE NOS MODELOS DO CMIP6 PARA MUNICÍPIOS DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE (PE), BRASIL. *Caminhos Geogr.* **2024**, *25*, 58–79. [\[CrossRef\]](#)
34. Moreira, M.; Silva, D.; Pruski, F.; Lara, M. Índices Para Identificação de Conflitos Pelo Uso Da Água: Proposição Metodológica e Estudo de Caso. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* **2012**, *17*, 7–15. [\[CrossRef\]](#)
35. Feng, D.; Beighley, E. Identifying Uncertainties in Hydrologic Fluxes and Seasonality from Hydrologic Model Components for Climate Change Impact Assessments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2020**, *24*, 2253–2267. [\[CrossRef\]](#)
36. Ley, R.; Casper, M.C.; Hellebrand, H.; Merz, R. Catchment Classification by Runoff Behaviour with Self-Organizing Maps (SOM). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2011**, *15*, 2947–2962. [\[CrossRef\]](#)

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

TERCEIRA PARTE

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de modelos climáticos da base de dados do NEX-GGDP-CMIP6 mostrou-se satisfatório para representar o comportamento da precipitação e secas na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba. Com base nos resultados obtidos para os índices de seca, conclui-se que as mudanças climáticas tendem a alterar, significativamente, o comportamento das secas, sendo verificadas maiores magnitudes para o final do século (2081-2100).

Em relação à simulação hidrológica frente às mudanças climáticas, o modelo hidrológico MHD-INPE simulou satisfatoriamente as vazões da bacia para o cenário *baseline* e os cenários futuros, considerando os períodos de 2040-2060, 2061-2080 e 2081-2100. As simulações hidrológicas realizadas indicaram reduções nas vazões mínimas e aumento das vazões máximas, refletindo modificações no comportamento hidrológico da bacia. Portanto, o padrão observado nos cenários futuros sugere maior irregularidade na disponibilidade hídrica, com coexistência de condições favoráveis à intensificação de eventos de estiagem e aumento do potencial para eventos extremos, colocando em risco a manutenção hídrica da bacia.

Considerando a relevância socioeconômica e ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, responsável pela manutenção de diferentes atividades econômicas, tais como abastecimento público, atividades industriais, mineração, irrigação e geração de energia, os resultados desta pesquisa reforçam a necessidade de incorporar as projeções climáticas ao planejamento e à gestão dos recursos hídricos. Embora existam incertezas inerentes às projeções climáticas e à modelagem hidrológica, os resultados obtidos, considerando eventos de seca e as respostas hidrológicas, convergem para um cenário de maior estresse hídrico e intensificação dos extremos hidrológicos ao longo do século XXI, evidenciando a necessidade de ações preventivas, medidas adaptativas e planejamento de longo prazo.

REFERÊNCIAS

- ABUD, C. O. et al. Mudança climática: uma crise previsível. **UNISANTA Law and Social Science**, v. 12, n. 1, p. 191-209, 2023.
- AGUILAR, D. C.; COUTINHO DE PAULA, E. Avaliação da sazonalidade na qualidade da água do rio Paraopeba. In: **III Simpósio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco - SBHRSF**. Belo Horizonte/MG, p. 1-8, 2020.
- ANJOS, R. R. et al. Análise de tendência de temperatura e precipitação e cenários de mudanças climáticas para Pelotas (RS). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.9, n.8, p.93-108, 2018.
- ALVARENGA, L. A. et al. Performance of a distributed hydrological model based on soil and moisture zone maps. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 41, n. 0, 2017.
- ALVARENGA, L. A. et al. Impacts of Climate Change on the Hydrology of a Small Brazilian Headwater Catchment Using the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model. **American Journal of Climate Change**, Lavras, v. 7, n. 02, p. 355, 2018.
- ALVARENGA, L. A. et al. Hydrological simulation with SWAT and VIC models in the Verde River Watershed, Minas Gerais. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 15, n. 4, p. 1, 2020.
- ALVARENGA, C. M., et al. Meteorological Droughts in the Paraopeba River Basin: Current Scenarios and Future Projections. **Land-Climate Interactions**, v. 14, 10, 2025.
- AMARAL, D. P. B. et al. Metodologia para desenvolvimento de um sistema de predição de inundações para as bacias piloto dos rios Piabanha e Paqueta, região serrana do Rio de Janeiro. **III Simpósio de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul**, 2017.
- BARBINO, G. C. et al. Os eventos extremos como instrumentos de informação na gestão dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 34, n. 20, p.224-241, 2024.
- BARCELLOS, C. et al. Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. **Epidemiol. Serv. Saúde**. Brasília. v. 18 n, 3, p. 285-304, 2009.
- BARROS da SILVA, B. M. et al. Índices para a gestão e planejamento de recursos hídricos na bacia do rio Paraopeba, Estado de Minas Gerais. **Revista. Ambiente & Água**, v. 10, n. 3, p. 686 – 697, 2015.
- BAZZANELA, A. C. et al. Performance of CMIP6 models over South America. **Climate Dynamics**, p. 1501–1516, 2024.
- BRUNETT, A. et al. Refugiados climáticos, aquecimento global, desertificação e migrações: reflexos globais e locais. **Interseções**. Rio de Janeiro, v. 23 n. 2, p. 318-333, 2021.
- BOLSON, S. H. HAONAT, A. I. A Governança da Água, a Vulnerabilidade Hídrica e os Impactos das Mudanças Climáticas no Brasil. **Veredas do Direito**. Belo Horizonte, v.13, n.25, p.223-248, 2016.

- 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.
- CALDEIRA, T. L.; et al. Modelagem Hidrológica Determinística Chuva-Vazão em Bacias Hidrográficas: uma Abordagem Introdutória. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**. Pelotas, v.5, n.1, p.22-32, 2018.
- CARVALHO, L. G. S. **Modelos Hidrológicos para Pequenas Bacias Urbanas: um estudo teórico experimental**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.
- COSTA, G. K. L. et al. Impacto das mudanças climáticas nas vazões mínimas de referência de pequenas bacias hidrográficas na Amazônia Legal e dentro do arco do desflorestamento. **Revista de Gestão de Água da América Latina**. Porto Alegre, v. 20, e6, 2023.
- DAL'AGNOL, S. et al. Estimativa da umidade do solo usando o modelo hidrológico distribuído MHD-INPE: estudo de caso na Bacia do Purus. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. João Pessoa, p.4292-4299, 2015.
- DIAS, C.; REBOITA, G. M. S. Assessment of CMIP6 Simulations over Tropical South America. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1282–1295, 2021.
- DURÃES, M. F.; DE MELLO, C. R. Avaliação do estresse hidrológico na Bacia Do Rio Paraopeba - MG. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves-RS,
- ESPÍNDOLA, I. B; RIBEIRO, W. C. Águas transfronteiriças e mudanças climáticas: desafios para a segurança hídrica na América do Sul. **Revista USP**, n. 138, p.119-134, 2023.
- FARIAS, V. E. M. et al. Perspectivas climáticas futuras com base nos modelos do CMIP6 para municípios da região metropolitana do Recife (PE), Brasil. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 25, n.101, p. 58-79, 2024.
- FALCK, A. S. et al. Assessment of subseasonal streamflow predictions in a tropical basin. **Journal of Hydrology**, v. 651, 132488, 2025.
- FERREIRA, G. W. S. et al. Assessment of Precipitation and Hydrological Droughts in South America through Statistically Downscaled CMIP6 Projections. **Climate**, v. 11, n. 8, p. 1-29, 2023.
- FIGUEIREDO, D. M. et al. Relação entre agropecuária e segurança hídrica no cenário das mudanças climáticas. **Anais do XII Congresso Brasileiro de Agroecologia**, v. 19, n.1, 2024.
- FRANÇA, G. A.F. et al. Tendências recentes e alterações no regime de precipitações na bacia do rio Paraopeba. XXVI Simpósio de Recursos Hídricos, Vitória-ES, 2025

GONÇALVES, A. S. et al. Previsões preliminares de desastres hidrológicos na bacia do Rio Doce. **XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, Natal, p. 109, 2014.

GUIMARÃES, S. A. et al. Projeções de Mudanças Climáticas sobre o Nordeste Brasileiro dos Modelos do CMIP5 e do CORDEX. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, 337-365, 2016.

HANNA, J. W. et al. Updated bioclimatic modeling of *Armillaria solidipes* in the Intermountain Region (USA). **Proceedings of the 68th Western International Forest Disease Work Conference**, p. 175-181, 2023.

HONORATO, P. A. R. Dissertação (Mestrado em Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Áreas de Conflito Declaradas em Minas Gerais – 2020. Belo Horizonte/MG: IGAM, 2019. Este mapa tem como objetivo apresentar as áreas de conflito declaradas em Minas Gerais até abril de 2019. Escala 1:3.800.000.

LIMA, E. P. et al. Análise da variabilidade ambiental da chuva no município de Chapada Gaúcha, Minas Gerais. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 5, n. 2, p. 2308-2326, 2022.

MACHADO, J. C. F. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável: Entre as Responsabilidades Comuns, Diferenciadas e Adaptativas às Mudanças Climáticas. *Revista Jurídica Eletrônica da UFPI*. **Arquivo Jurídico – Revista Jurídica Eletrônica da UFPI**. v. 11, n. 1, 2024

MARENGO, J.; A.; VALVERDE, M.C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Associação Brasileira de Recursos Hídricos/FBMC-ANA**. Porto Alegre, p 209-233.

MARENGO, J, SOARES, W, 2003: Impacto das modificações da mudança climática Síntese do Terceiro Relatório do IPCC. Condições climáticas e recursos hídricos no Norte do Brasil. Chapter 6 in *Clima e Recursos Hídricos* 9. Associação Brasileira de Recursos Hídricos/FBMC-ANA. Porto Alegre, Brasil, pp 209-233.

MARENGO, J.; SOARES, W. Impacto das modificações da mudança climática - Síntese do Terceiro Relatório do IPCC. **Revista Multiciência**. Campinas, 2007.

MARINHO FILHO, G. M. et al. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**. Canoas, v. 6, n. 2, p. p. 35-47, 2013.

MEDEIROS, F. J. et al. Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: From CMIP3 to CMIP6. **Weather and Climate Extremes**, v. 38, p. 1-22, 2022.

MELO, P. A. et al. Uncertainty analysis on long-term runoff projection from the Budyko framework and a conceptual hydrological model. **Journal of Water and Climate Change**, v. 15, p. 3850-3866, 2024.

MELO, P. A. et al. On the performance of conceptual and physically based modelling approach to simulate a headwater catchment in Brazil. **Journal of South American earth sciences**, v. 114, n. 103683, 2022.

MONTEIRO, P. B. C. L.; CABRAL, J. J. S. Eficiência de Cinco Modelos do CMIP6 na Previsão de Tendência de Chuvas para a Bacia do Rio Jordão, em Pernambuco. **XXVI Simpósio de Recursos Hídricos**, Vitória-ES, 2025

MOURA, M. P. et al. Avaliação do Impacto das Mudanças Climáticas em Regiões de Mineração no estado de Minas Gerais. **XXVI Simpósio de Recursos Hídricos**, Vitória-ES, 2025

MOREIRA, I. A. **Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão com dados de Radar e Pluviômetros**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidrológica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 81 p, 2005.

NEGRÃO, A. C.; et al. Modelo Hidrológico Distribuído MHD-INPE: **Manual de Implementação**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. São José dos Campos, 2016.

NERES, D. R. et al. Efeitos das Mudanças Climáticas na Região Norte de Minas Gerais. *Revista Mineira de Recursos Hídricos*, v. 6, e025001, 2025.

OLIVEIRA, C. M. M. et al. Hydrological Model Performance in the Verde River Basin, Minas Gerais, Brazil. **Resources**, 12(8), 87, 2023.

OLIVEIRA, D. M. et al. Performance dos modelos climáticos do CMIP6 em simular a precipitação em subdomínios da América do Sul no período histórico. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.16, n.1, p 116-133, 2023.

OLIVEIRA, K. D. et al. Impacts of sugarcane expansion on water availability in a river basin in southeastern Brazil. **CATENA**, v. 216, p. 106437, 2022.

OLIVEIRA, V. A. et al. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande River basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 15, p. 5005–5023, 2017.

O'NEILL, B. C. et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 169-180, 2017.

PAIVA, A. C. E. et al. Segurança hídrica e energética na bacia do Paraíba do Sul diante das mudanças climáticas – 1: extremos hidrológicos. **IV Simpósio de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul**, Campos dos Goytacazes, 2024.

PEDERSEN, J. T. S. et al. IPCC emission scenarios: How did critiques affect their quality and relevance 1990–2022?. **Global environmental change: human and policy dimensions**, v. 75, n. 102538, p. 1-17, 2022.

PETRIELLI, G. P. **Avaliação georreferenciada dos impactos das mudanças climáticas na produção de cana-de-açúcar no Brasil**. 128 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energético) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2024.

PILOTTO, I. L. et al. Impacts of the land use and land-cover changes on local hydroclimate in southwestern Amazon. **Springer**, v. 61, p. 5597-5612, 2023.

PINTO, P. R. F. **Segurança hídrica na bacia hidrográfica do Rio Paraopeba**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 90 p., 2024.

POLLIT, H. et al. The role of the IPCC in assessing actionable evidence for climate policymaking. *npj climate action*, v. 3, n. 1, 2024.

REBOITA, M. S. et al. Assessment of precipitation and near-surface temperature simulation by CMIP6 models in South America. **Environmental Research: Climate**, v. 3, n. 2, 2024.

REIS JUNIOR, N. C. et al. Mudanças Climáticas. 1 ed. Jundiaí: **Paco Editorial**, 2023.

RIBEIRO, L. C. et al. Avanços na compreensão de mudanças climáticas e vazões extremas no Brasil. **III Encontro Nacional de Desastres**. Porto Alegre: ABRHidro, 2023.

REZAIY, R.; SHABRI, A. An innovative hybrid W-EEMD-ARIMA model for drought forecasting using the standardized precipitation index. **Natural Hazards**, v. 120, nº 14, p. 13513-13542, 2024.

RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J. On the ability of large-scale hydrological models to simulate land use and land cover change impacts in Amazonian basins. *Hydrological Sciences Journal*, p. 1– 16, 4 maio 2016.

ROSA, L. et al. Segurança hídrica e revitalização: um olhar sobre a bacia hidrográfica do Rio São Francisco. **XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, 2021.

ROTBEEI, F. et al. Projected Drought Intensification in the Büyük Menderes Basin Under CMIP6 Climate Scenarios. **Climate**, v. 13, n. 3, p. 1-17, 2025.

SAMPAIO, G. et al. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, São Paulo, n. 103, p. 41-54, 2014.

SANTANA, L. R. **Contribuição à classificação de pequenas bacias hidrográficas em função da área de drenagem**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

SANTOS, D. P. **Monitoramento e modelagem de processos hidrológicos como base para a gestão de recursos hídricos em região semiárida**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018.

SANTOS, J. L. C.; SILVA, T. Crise hídrica na bacia hidrográfica do manancial Serra Azul (Minas Gerais). **XXI Simpósio Brasileira de Recursos Hídricos**, Brasília, 2015.

SALES, D. C. et al. Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no nordeste brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n.4, p. 435-456, 2015.

SILVA, M. V.M. et al. Impactos dos cenários de mudanças climáticas e demandas consuntivas no desempenho dos reservatórios do rio São Francisco, Brasil Crise hídrica na bacia hidrográfica do manancial Serra Azul (Minas Gerais). **XXIV Simpósio Brasileira de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, 2021.

SIQUEIRA, P. P. et al. Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of hydrology. Regional studies**, v. 37, n. 100931, p. 100931, 2021.

SPRUIELL, C. A. et al. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. **Transactions of the ASAE**, v.43, p.1431-1439, 2000.

SOARES, A. L. C.; et al. Influência das atividades antrópicas e do rompimento da barragem I, da mina Córrego do Feijão, na qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Paraopeba. **Revista Mineira de Recursos Hídricos**, v. 3, p. 61, 2022.

SOARES, W. R.; CORREA, W. S. C. Um Alerta Vermelho para a Humanidade”: As principais conclusões dos três relatórios de avaliação (AR6) do IPCC de 2021 e 2022. **Instituto de Estudos Climáticos**, 2023.

SUN, P. et al. Development of a nonstationary Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (NSPEI) and its application across China. **Atmospheric Research**, v. 300, 107256, 2024.

TEBALDI, C. et al. Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth Syst. Dynam.*, Heidelberg, v. 12, n. 1, p. 253- 293, 2021.

TOMASELLA, J. et al. **Modelo Hidrológico Distribuído MHD-INPE: Manual de Implementação (Versão 2.0)**. Cachoeira Paulista: Cemaden, 2022

TUCCI, C. E. M. **Programa de Drenagem Sustentável: Apoio ao Desenvolvimento do Manejo das Águas Pluviais Urbanas**. Ministério das Cidades, 2005.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Dossiê Água**, v. 22, n. 63, p. 7–16, 2008.

VIOLA, M. R. 2008. **Simulação hidrológica na região Alto Rio Grande a montante do Reservatório de Camargos/CEMIG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

VIOLA, M. R., et al. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental/Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, 13(5), 581–590.

VON RANDOW, R. C. S. et al. Response of the river discharge in the Tocantins River Basin, Brazil, to environmental changes and the associated effects on the energy potential. **Regional Environmental Change**. São José dos Campos, v. 19, n. 1, p. 193-204, 2019.

WARREN, M. S. Integração de sensoriamento remoto e modelos hidrológicos para a estimativa da evapotranspiração: uma revisão bibliográfica. **GEOUSP**. São Paulo, n. 35, p. 143-159, 2013.

ZÁKHIA, E. M. S. et al. Avaliação de projeções climáticas para uma bacia experimental, localizada na região sul de Minas Gerais. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.11, n.6, p.234-250, 2020.

ZÁKHIA, E. M. S. Impactos das Mudanças Climáticas em uma Bacia Hidrográfica no Sul do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 36, n. 4, p. 667-681, 2021.