

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Modelagem hidrológica de bacias hidrográficas com predominância de irrigação utilizando produtos de precipitação

Caio Henrique Patricio Pagani
Doctor Scientiae

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024

CAIO HENRIQUE PATRICIO PAGANI

Modelagem hidrológica de bacias hidrográficas com predominância de irrigação utilizando produtos de precipitação

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues

Coorientadora: Gabrielle Ferreira Pires

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

P129m
2024
Pagani, Caio Henrique Patrício, 1989-
Modelagem hidrológica de bacias hidrográficas com
predominância de irrigação utilizando produtos de precipitação /
Caio Henrique Patrício Pagani. – Viçosa, MG, 2024.
1 tese eletrônica (131 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2024.
Referências bibliográficas: f. 106-131.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.505>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Bacias hidrográficas - Rio Paracatu (MG) - Medição.
2. Irrigação agrícola. I. Rodrigues, Lineu Neiva, 1968-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.
III. Título.

CDD 22. ed. 551.48

CAIO HENRIQUE PATRICIO PAGANI

Modelagem hidrológica de bacias hidrográficas com predominância de irrigação utilizando produtos de precipitação

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 19 de dezembro de 2024.

Assentimento:

Caio Henrique Patricio Pagani
Autor

Lineu Neiva Rodrigues
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 01/09/2025 às 15:41:56 e pelo orientador em 04/09/2025 às 18:54:33. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **BNX6.ENUB.5LA9** e clique no botão 'Validar documento'.

Se te mostrares frouxo no dia da batalha a sua força será fraca. (Provérbios 24:10)
Aqueles que semeiam com lágrimas colherão com cânticos de alegria. (Salmos
126:5)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus toda vez que me lembro de vós (Filipenses 1:3). Com essa inspiração, inicio meus agradecimentos a todos que contribuíram para a realização desta tese.

Sou grato à Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de cursar o doutorado. Ao coordenador Ernandes Rodrigues de Alencar, registro minha admiração pela liderança exemplar no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Minha profunda gratidão ao orientador Dr. Lineu Neiva Rodrigues (EMBRAPA Cerrados), pela confiança e orientação ao longo da jornada, e à coorientadora Gabrielle Ferreira Pires (UFV), pela dedicação e parceria. Agradeço também aos professores Dr. Elpídio Inácio Fernandes Filho e Dr. Márcio Rocha Francelino pelo suporte técnico e pela infraestrutura do LABGEO.

Aos meus pais, Wilson e Joseane, minha eterna gratidão pelo apoio incondicional desde que deixei Jaru (RO) aos 15 anos para seguir minha trajetória acadêmica. Aos meus irmãos Pamela e Igor, obrigado pelo suporte emocional durante o doutorado.

Ao meu tio, Prof. Dr. Josenilton Patrício Rocha (UFMG), agradeço pela orientação constante, inclusive em detalhes como a escolha do notebook ideal para os trabalhos. Ao amigo Adriano Reis Prazeres Mascarenhas, sou grato pela amizade de longa data e pela ajuda na escolha do programa de doutorado. Ao amigo Rômulo Borel, agradeço pelo incentivo à UFV.

Registro minha gratidão ao amigo Cassio Marques Moquedace dos Santos, cuja parceria foi essencial em Viçosa, especialmente no aprendizado da linguagem R. Ao Dr. Lucas Gomes Carvalho (UFV), agradeço pela contribuição na banca de qualificação e pela introdução ao complexo ArcSWAT. Ao Dr. Rafael Mingoti (EMBRAPA Territorial), sou grato pela orientação no SWAT-CUP. À amiga Juliete Catein (UFV), agradeço pela ajuda na migração para o QSWAT e pelas valiosas dicas.

Aos colegas Máisa Quintiliano Alves e Marcelo Carazo Castro, minha gratidão pela parceria durante os desafios da pandemia. Aos amigos Tamíres Partéle Correa, Rafael Avalenga Almeida, Rodrigo Ribeiro e Filipe (ANA), agradeço pelos esclarecimentos técnicos sobre o SWAT.

À amiga Gessiane Carolina Borgio Barbosa, sou grato pela companhia e apoio entre 2019 e 2021. À amiga Angelina Moreira Melo, agradeço pelo incentivo entre 2022 e 2023, especialmente nos momentos difíceis.

Ao grupo do LABGEO, obrigado pelos momentos de descontração e apoio. Um agradecimento especial ao pedólogo Danilo Cesar de Mello e ao incansável Gustavo Vieira Velloso, carinhosamente apelidados de “Pink e o Cérebro”, pela contribuição científica e inspiração. Aos estagiários Marcelo Krauser e Lucas Vieira, agradeço pela parceria nos longos dias de trabalho.

Por fim, aos amigos do CRRH — Fernanda Laurinda, Diego Bispo, Silas Alves Souza, Fernanda Borges, Tarcila Generoso, Erli Pinto, Micael Fraga, Rafael Petruceli e Daniel Althoff — minha sincera gratidão pelo apoio constante ao longo desta caminhada.

RESUMO

PAGANI, Caio Henrique Patricio, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2024. **Modelagem hidrológica de bacias hidrográficas com predominância de irrigação utilizando produtos de precipitação.** Orientador: Lineu Neiva Rodrigues. Coorientadora: Gabrielle Ferreira Pires.

O Cerrado, representando 24% do território brasileiro, é o segundo maior bioma do Brasil. Essa região produz cerca de 60 % da produção agrícola brasileira. Ao longo dos últimos anos, tem-se notado em várias regiões do Cerrado uma tendência de aumento das disputas pelo uso de recursos hídricos, indicando a necessidade de adotar estratégias de desenvolvimento baseadas em planejamento estratégicos, que busque a locação equitativa da água na região. A carência desses dados hidrometeorológicos, entretanto, para a região do Cerrado tem limitado a utilização de modelos matemáticos e, conseqüentemente, dificultado a inclusão de cenários nos planos de desenvolvimento, o que, muitas vezes, leva a simplificações nas tomadas de decisão. O objetivo geral desta tese, estruturada em forma de artigos, foi avaliar, por meio de modelagem hidrológica, a disponibilidade hídrica atual e futura da bacia hidrográfica do rio Paracatu (BHRP). A BHRP é estratégica para a produção agrícola do Cerrado e para a formação das vazões do rio São Francisco. No primeiro artigo, avaliou-se a disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Paracatu, por meio da modelagem hidrológica. A vazão média anual foi igual a 278,53 m³/s. Os resultados demonstraram bom desempenho nos processos de calibração (NSE = 0,6874) e validação (NSE = 0,8206). A análise da curva de permanência revelou que, em 95% do tempo, as vazões foram iguais ou superiores a 26,61 m³/s e 36,77 m³/s para Q90. As maiores vazões máximas e mínimas ocorreram em janeiro, com 1422 m³/s no ano de 2007 e 65,94 m³/s em 2015, respectivamente. Observou-se uma tendência de aumento nas vazões mínimas e redução nas máximas, indicando potencial para irrigação agrícola em períodos secos. No segundo artigo avaliou-se a acurácia de diferentes produtos de precipitação na estimativa da disponibilidade hídrica por meio da modelagem hidrológica. Os produtos de precipitação com melhor desempenho foram, o GPCC, seguido pelo ERA5 e pelo CHIRPS. O produto PERSIANN-CDR apresentou desempenho satisfatório, enquanto o MSWEP foi avaliado como insatisfatório, evidenciando variações significativas na precisão entre os diferentes produtos analisados. No teste estatístico de Mann-Whitney, todos produtos atingiram valores acima de 0,05, indicando que as vazões simuladas pelos produtos de precipitação são estatisticamente equivalentes às vazões observadas, ou seja, não houve diferença

estatística entre os dados. Assim, as diferenças entre as distribuições acumuladas dos dados observados e simulados não são relevantes para comprometer a equivalência entre as séries. Esses resultados determinam a confiabilidade dos produtos de precipitação analisados na reprodução das vazões observadas na BHRP, destacando seu potencial para aplicações em estudos hidrológicos e no planejamento de recursos hídricos. No terceiro artigo foi avaliado o comportamento da vazão em cenários futuros de mudanças climáticas no posto fluviométrico Porto Extrema, utilizando o modelo SWAT a partir de dados de índice climáticos extremos do modelo climático MIROC6 CLIMBRA sob dois cenários SSP2-4.5 e SSP5- 8.5. A curva de permanência indicou um período significativo, entre 99% e 66% do tempo, em que a vazão atingiu valores nulos ($0 \text{ m}^3/\text{s}$), para o cenário SSP2-4.5 para o modelo MIROC6, enquanto para o cenário SSP5-8.5, a situação foi menos crítica em termos de vazões mínimas, sem registro de valores nulos ao longo do período analisado, apresentando vazão de $17,2 \text{ m}^3/\text{s}$ em 95% do tempo, o que indica uma maior resiliência hídrica comparada ao cenário SSP2-4.5. Além disso, o cenário SSP5-8.5 atingiu valores 31% para Q95 e 62,7% para Q90 abaixo quando comparados aos dados observados que possuem valores de $18,7 \text{ m}^3/\text{s}$ e $46,1 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente. Ao verificar o resultado do p_valor para o cenário SSP2-4.5, foi encontrado um valor de 0,03994, valor que ficou abaixo de 0,05, indicando que as vazões simuladas não são estatisticamente equivalentes às vazões observadas, ou seja, havendo diferença estatística entre os dados. Enquanto, ao verificar o resultado do p_valor para o cenário SSP5-8.5, foi encontrado um valor de 0,514746, valor acima de 0,05, indicando que as vazões simuladas são estatisticamente equivalentes às vazões observadas, ou seja, não há diferença estatística entre os dados.

Palavras-chave: Agricultura irrigada; Recursos Hídricos; Hidrologia; Cerrado; SWAT; Produtos de Precipitação; Escassez Hídrica

ABSTRACT

PAGANI, Caio Henrique Patricio, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2024. **Hydrological modeling of river basins with predominance of irrigation using precipitation products.** Adviser: Lineu Neiva Rodrigues. Co-adviser: Gabrielle Ferreira Pires.

The Cerrado, representing 24% of Brazil's territory, is the country's second-largest biome. This region accounts for approximately 60% of Brazil's agricultural production. Over recent years, an increasing trend of disputes over water resource use has been observed in various areas of the Cerrado, highlighting the need for strategic development planning to ensure equitable water allocation in the region. However, the lack of hydrometeorological data in the Cerrado has limited the use of mathematical models and, consequently, hindered the inclusion of scenarios in development plans, often leading to simplified decision-making processes. The primary objective of this thesis, structured as a series of articles, was to evaluate the current and future water availability in the Paracatu River Basin (BHRP) through hydrological modeling. The BHRP is strategically important for agricultural production in the Cerrado and for contributing to the flow of the São Francisco River. In the first article, the water availability of the Paracatu River Basin was evaluated using hydrological modeling. The annual average flow was found to be 278.53 m³/s. The results showed good performance in calibration (NSE = 0.6874) and validation (NSE = 0.8206). The flow duration curve revealed that, 95% of the time, flows were equal to or greater than 26.61 m³/s and 36.77 m³/s for Q90. The highest maximum and minimum flows occurred in January, with 1422 m³/s in 2007 and 65.94 m³/s in 2015, respectively. A trend of increasing minimum flows and decreasing maximum flows was observed, indicating potential for agricultural irrigation during dry periods. In the second article, the accuracy of different precipitation products in estimating water availability was evaluated through hydrological modeling. The best-performing precipitation products were GPCC, followed by ERA5 and CHIRPS. The PERSIANN-CDR product showed satisfactory performance, while MSWEP was deemed unsatisfactory, highlighting significant variations in the precision of the analyzed products. The Mann-Whitney statistical test indicated that all products achieved p-values above 0.05, suggesting that the flows simulated by the precipitation products were statistically equivalent to the observed flows, with no significant statistical differences between the datasets. Thus, the differences between the cumulative distributions of observed and simulated data are not relevant to compromise the equivalence between the series. These results

confirm the reliability of the analyzed precipitation products in reproducing observed flows in the BHRP, emphasizing their potential for applications in hydrological studies and water resource planning. In the third article, streamflow behavior under future climate change scenarios was assessed at the Porto Extrema gauging station using the SWAT model, based on extreme climate index data derived from the MIROC6 climate model (CLIMBRA project), under two Shared Socioeconomic Pathways: SSP2-4.5 and SSP5-8.5. The flow duration curve indicated a critical period—between 99% and 66% of the time—when the streamflow reached zero values ($0 \text{ m}^3/\text{s}$) for the SSP2-4.5 scenario using the MIROC6 model. In contrast, under the SSP5-8.5 scenario, the situation was less severe in terms of low flows, with no records of zero streamflow throughout the evaluated period. Instead, a flow of $17.2 \text{ m}^3/\text{s}$ was maintained 95% of the time, indicating greater hydrological resilience compared to the SSP2-4.5 scenario. Additionally, under the SSP5-8.5 scenario, the Q95 and Q90 flows were 31% and 62.7% lower, respectively, when compared to the observed values of $18.7 \text{ m}^3/\text{s}$ and $46.1 \text{ m}^3/\text{s}$. When analyzing the p-value for the SSP2-4.5 scenario, a result of 0.03994 was obtained, which is below the 0.05 significance threshold. This indicates that the simulated streamflows are not statistically equivalent to the observed flows, suggesting a significant difference between them. Conversely, the p-value for the SSP5-8.5 scenario was 0.514746, which is above 0.05, indicating that the simulated flows are statistically equivalent to the observed ones—i.e., no significant difference was found between the datasets.

Keywords: Irrigated agriculture; Water resources; Hydrology; Cerrado; SWAT; Precipitation products; Water scarcity

SUMÁRIO

1. Introdução geral.....	12
2. Artigos científicos	15
2.1 Estimativa da disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Paracatu.....	15
2.1.1 Introdução.....	16
2.1.2 Materiais e Métodos	18
2.1.3 Resultados e Discussão.....	27
2.1.4 Conclusões.....	38
2.2 Avaliação de produtos de precipitação na estimativa da disponibilidade hídrica	39
2.2.1 Introdução.....	40
2.2.2. Materiais e Métodos	42
2.2.3. Resultados e Discussão.....	50
2.2.4. Conclusões.....	71
2.3 Impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Paracatu	73
2.3.1 Introdução.....	74
2.3.2 Materiais e Métodos	77
2.3.3 Resultados e Discussão.....	82
2.3.4. Conclusões.....	104
3. Conclusões gerais.....	106
4. Referências	107

1. Introdução geral

O Cerrado possui uma extensão de aproximadamente 200 milhões de hectares. Com essa área, o Cerrado representa 24% do território brasileiro (BOLFE et al., 2020). Essa região foi fundamental para ascensão da agricultura brasileira no cenário internacional (CAVALCANTE, 2019; RODRIGUES; ZACCARIA, 2020).

Ao longo dos últimos anos, tem-se notado em várias regiões do Cerrado, principalmente naquelas regiões onde a agricultura irrigada se expandiu com pouco planejamento, como, por exemplo, na bacia hidrográfica do rio Paracatu (BHRP), uma tendência de aumento das disputas pelo uso de recursos hídricos (COSTA et al., 2021; PERIN, 2011). Essa tendência de aumento pelo uso de recursos hídricos pode se tornar ainda mais acentuada devido aos efeitos advindos das mudanças climáticas, tais como aumento da temperatura e a redução da precipitação (CHOU et al., 2005; SONE et al., 2022), prolongamento da estação seca (CAMPOS; CHAVES, 2020) e redução da vazão disponível em cursos d'água (MOREIRA et al., 2014).

Em regiões como a da BHRP, onde a agricultura é intensiva e os efeitos do clima aumentam a escassez hídrica e demanda pelo uso de recursos hídricos (RH), é fundamental que se desenvolva um planejamento estratégico, que considere o potencial de crescimento da agricultura irrigada e de uso de recursos hídricos.

A complexa interação existente entre diversos fatores, tais como, as condições de clima e de cobertura e uso da terra, inerentes ao processo hidrológico, dificulta o planejamento, fazendo dos modelos matemáticos e computacionais as ferramentas mais adequadas para proposição de cenários hidrológicos com vista ao desenvolvimento sustentado da agricultura irrigada na região. Esses modelos possibilitam a criação de cenários e avaliação preditiva do impacto de diferentes estratégias de planejamento na disponibilidade e oferta hídrica.

O maior desafio para a utilização desses modelos é a carência de dados hidrometeorológicos históricos das regiões, como base de dados qualificadas, que apresente séries históricas de longa duração e com dados consistidos. Esse problema é mais evidente ainda nas pequenas bacias hidrográficas, onde a falta de informação além de comprometer a gestão de recursos hídricos e má gestão aumentar as disputas pelo uso da água, reduz a qualidade de vida das pessoas.

A literatura apresenta uma grande diversidade de modelos hidrológicos, baseados em diferentes concepções, que podem ser utilizados para estimativa da oferta e da demanda hídrica (EGER et al., 2021; FUKUNAGA et al., 2015). Esses modelos tornam-se mais importantes à medida que novas bases de dados são disponibilizadas. No entanto, os modelos precisam ser

adequados para poderem apropriar da evolução recente dos produtos de reanálise e de sensoriamento remoto, que são crescente fonte de dados de observações terrestres (ALMEIDA; SERRA, 2017 ; MARINHO FILHO et al., 2013).

Os produtos de precipitação apresentam grande potencial de aplicação. Por apresentarem cobertura quase global e alta resolução espaço-temporal, os produtos têm sido amplamente utilizados, inclusive em estudos no Cerrado brasileiro (AHMED et al., 2022; TAN et al., 2018; AMORIM et al., 2020; JUNQUEIRA et al., 2022; LIMA et al., 2011; TAN et al., 2018).

Na atualidade, existem diversos produtos de precipitação disponíveis, tais como: ERA5 (HERSBACH et al., 2020), PERSIANN-CDR (MODEL, 2022), MSWEP (BECK et al., 2017), GPCC 7.0 (BASHEER; ELAGIB, 2019), CHIRPS (FUNK et al., 2015, 2014) . Esses produtos possuem cobertura em todo território brasileiro e podem ser uma alternativa para o problema de falta de dados em várias regiões brasileiras. Por outro lado, é importante que esses produtos sejam avaliados regionalmente, antes de serem efetivamente utilizados.

Pela sua vasta aplicação e resultados obtidos em diferentes ambientes, o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um dos modelos hidrológicos mais utilizados na atualidade. A utilização do modelo SWAT, associado aos produtos de precipitação, apresenta-se como uma alternativa promissora que pode contribuir para a gestão dos recursos hídricos em regiões irrigadas, onde há escassez de dados pluviométricos e fluviométricos. Esses produtos, entretanto, precisam ser melhor avaliados para o Cerrado, principalmente nas bacias hidrográficas agrícolas que fazem uso de irrigação e apresentam conflitos potenciais pelo uso de água.

Outro aspecto importante a ser destacado, é melhoria do planejamento de RH por meio da simulação de cenários futuros, que podem ser realizados utilizando modelos climáticos, para avaliação da disponibilidade hídrica. Para as regiões central e sudeste do Brasil, por exemplo, trabalhos recentes (ALTHOFF; RODRIGUES; DA SILVA, 2020; CAMBRAIA NETO et al., 2021; DE SOUZA et al., 2019) projetam queda na precipitação e um aumento na temperatura, com redução na vazão dos rios e, conseqüentemente, afetando a agricultura irrigada ao longo do século.

Até o momento, poucas pesquisas foram realizadas com o foco no impacto das mudanças climáticas na dinâmica da disponibilidade hídrica futura (COSTA et al., 2021; SOUZA et al., 2010), especialmente em regiões do Cerrado, como, por exemplo, a bacia do Rio Paracatu. Por essa razão, é crucial expandir as pesquisas para avaliar as como as mudanças climáticas projetadas.

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar, por meio da modelagem hidrológica, a disponibilidade hídrica atual e futura da bacia hidrográfica do rio Paracatu (BHRP). A BHRP é estratégica para a produção agrícola do Cerrado e para a formação das vazões do rio São Francisco.

O objetivo do primeiro artigo da tese foi estimar a disponibilidade hídrica, com base em dados históricos, da bacia hidrográfica do rio Paracatu. Para estimativa da disponibilidade hídrica da bacia foi utilizado o modelo hidrológico SWAT, que foi calibrado e validado para uma região com dados históricos e utilizado na regionalização da vazão da bacia do Paracatu.

O objetivo do segundo artigo foi avaliar a acurácia de diferentes produtos de precipitação na estimativa da disponibilidade hídrica por meio da modelagem hidrológica. Para isto, foram avaliados cinco produtos de precipitação (CHIRPS, ERA5, GPCC, MSWEP, PERSIANN-CDR).

O objetivo do terceiro artigo da tese foi analisar os cenários de mudanças climáticas utilizando o modelo climático MIROC6 do conjunto de dados de mudanças climáticas para o Brasil, avaliando os impactos dessas mudanças sobre a disponibilidade hídrica na BHRP.

De forma geral, os objetivos da tese se complementam, contribuindo com o aumento do conhecimento para a gestão e planejamento dos recursos hídricos no bioma do Cerrado, além de contribuir com informações para o desenvolvimento sustentável da BHR.

2. Artigos científicos

2.1 Estimativa da disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Paracatu

Resumo

A bacia hidrográfica do rio Paracatu (BHRP), está inteiramente inserida no bioma Cerrado, abrangendo os estados de Goiás e Minas gerais e o Distrito Federal. A BHRP, drenando uma área de aproximadamente 45.600 km², é fundamental para a formação da vazão do rio São Francisco, rio estratégico para o desenvolvimento do semiárido brasileiro. A BHRP, entretanto, tem enfrentado escassez hídrica em algumas de suas sub bacias, o que tem comprometido o desenvolvimento e a qualidade de vida das pessoas. Esse cenário se agrava pela falta de informações, como a oferta hídrica, para subsidiar os tomadores de decisão. O objetivo deste artigo foi estimar, por meio de modelagem hidrológica, a disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Paracatu. Para modelagem da disponibilidade hídrica, foi utilizado o software SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). O modelo foi calibrado para o período de 1988 a 2008 e validado no período de 2009 a 2018. Após a avaliação da análise de sensibilidade, verificou-se que SOL_K, GW_REVAP, CN2 e ESCO foram aos parâmetros mais sensíveis do modelo. Esses parâmetros representam a condutividade hidráulica saturada do solo, taxa de evaporação da água subterrânea, número da curva de escoamento e evaporação do solo respectivamente. Após a calibração do modelo o valor de NSE foi igual a 0,69 e igual a 0,82, na validação, indicando um desempenho satisfatório e muito bom para o modelo, enquanto o coeficiente de determinação de Pearson (R²) foi de 0,72, na calibração e 0,82 na validação, o índice PBIAS obtido foi igual a 7,0% e -2,9%, na calibração e validação, respectivamente. Avaliando a vazão simulada no período de calibração, o modelo subestimou a vazão em 55% do tempo, com uma diferença média de volume igual a 7%, ou 23,40 m³/s. Na validação, o modelo superestimou a vazão em 60% do tempo, com uma diferença média de volume igual a 3%, ou 6,48 m³/s. A vazão média anual foi igual a 278,5 m³/s. Analisando a curva de permanência, observou-se que em 95% do tempo a vazão foi igual ou maior que 26,6 m³/s. A regionalização de vazão foi válida para a estação fluviométrica Barra da Égua, pois não apresentou vazões nulas, possibilitando a comparação com os valores das vazões observadas. Por outro lado, a regionalização para as estações Porto Alegre e Buritizeiro foram consideradas insatisfatórias, uma vez que apresentaram valores de vazões nulos. Portanto a disponibilidade hídrica da BHRP, foi considerada insatisfatória, por apresentar repentinamente 42 vazões com valores zero, para os meses de junho, julho agosto e setembro.

Palavras Chaves: SWAT, Agricultura Irrigada, Recursos Hídricos.

2.1.1 Introdução

A bacia hidrográfica do rio Paracatu (BHRP) está totalmente inserida no bioma Cerrado, abrangendo os estados de Goiás e Minas gerais e o Distrito Federal e 16 municípios, sendo 12 deles com sede dentro da área de drenagem da bacia.

De acordo com o atlas da irrigação (ANA, 2019; ANA, 2021), a região da BHRP, com 2.657 pivôs centrais, é um dos 15 polos de irrigação por pivô do país. Na região, irriga-se principalmente cana-de-açúcar, soja, algodão, milho e feijão. A demanda hídrica média dessa região é de 761 bilhões de litros/ano, com área irrigada de 135.000 ha, com potencial físico hídrico total de 143.000 ha e potencial efetivo de 32.000 ha, com 8% do seu território irrigado.

Tem-se observado ao longo dos últimos anos um aumento das disputas pelo uso de recursos hídricos na bacia do rio Paracatu (COSTA et al., 2021; GUALDANI; SOBRINHO, 2023 ; SILVA et al., 2023), o qual pode ser atribuído a um crescimento não planejado da agricultura irrigada. Esse aumento das disputas pelo uso da água pode vir ser agravados pelos efeitos advindos das mudanças climáticas, que pode alterar a intensidade e a frequência de eventos extremos, contribuindo para o aumento da incerteza sobre a disponibilidade hídrica futura (SONE et al., 2022).

As disputas pelo uso da água são observadas, principalmente, nas pequenas bacias hidrográficas não monitoradas, onde a dinâmica da disponibilidade hídrica (oferta) nas escalas temporais e espaciais necessárias para o adequado manejo da irrigação são desconhecidas (CAMPOS; CHAVES, 2020). Em regiões com baixa disponibilidade hídrica como se observa, por exemplo, no período seco na bacia do Paracatu, é de grande importância se ter um planejamento mais detalhado sobre o uso de recursos, visando a elaboração de estratégias que atendam aos usos múltiplos, reduzindo as disputas pelo uso da água (MOREIRA et al., 2014).

Relatórios da Agência Nacional de Água (ANA, 2019) e o do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM, 2022) indicam que pelo menos cinco cursos d'água da bacia do rio Paracatu já apresentam conflitos pelo uso da água. Em regiões que já apresentam algum conflito pelo uso de recursos hídricos, o desafio para o desenvolvimento sustentável é a alocação equitativa da água. A alocação é um processo de divisão de um bem entre indivíduos que frequentemente possuem interesses conflitantes (STUDART et al., 2021). Para se alocar a água de forma adequada, ou seja, atendendo aos seus usos múltiplos, é necessário conhecer a disponibilidade e a demanda hídrica em trechos específicos do curso de água.

Para que esse processo represente a realidade dos usuários, é importante que se tenha dados de vazão que representem da melhor forma possível a realidade da região, de forma a viabilizar um gerenciamento cada vez mais estratégico e preventivo, para não deixar os conflitos se agravarem. Segundo Anderson et al. (2021), a comunidade científica terá cada vez mais que desenvolver e transferir metodologias e ferramentas de apoio ao planejamento e gestão para se obter decisões mais fundamentadas e robustas.

A BHP, entretanto, na sua maior parte, é carente em dados e informações técnicas básicas. Nessa bacia, por exemplo, apenas 85% de sua extensão possui informações disponíveis sobre vazão, dificultando o processo de gestão (RODRIGUES et al., 2021). Uma possível solução para as regiões sem informação, é a utilização de técnicas de regionalização de vazões. A regionalização se baseia na espacialização de dados hidrológicos de natureza local, possibilitando a transferência de informações hidrográficas de bacias com medições (bacias doadoras) para aquelas desprovidas de tais medições (bacias receptoras) (ALTHOFF et al., 2022; SERRÃO et al., 2023). Isso constitui um método essencial para a projeção de vazões em bacias não monitoradas.

Os métodos de regionalização mais comumente aplicados podem ser agrupados em três categorias distintas: aqueles fundamentados em assinaturas hidrológicas (SCHOPPA et al., 2020), aqueles que se baseiam em regressão (RIBEIRO et al., 2022) e aqueles que se fundamentam em critérios de similaridade (JAHANSHAHI et al., 2022). Neste estudo, empregou-se a regionalização baseada em similaridade, que realiza a transferência de parâmetros por meio de métodos como proximidade espacial e/ou similaridade física.

O método de proximidade espacial envolve a transferência dos valores dos parâmetros da bacia hidrográfica geograficamente mais próxima, com base na suposição que bacias hidrográficas vizinhas são semelhantes. Baseando nessa premissa em que bacias hidrográficas próximas tendem a apresentar respostas hidrológicas semelhantes, incluindo regime de escoamento superficial, além de características físicas e climáticas uniformes. Portanto, o clima e outras características da bacia hidrográfica variam de maneira suave no espaço, assim é possível transferir os parâmetros, esperando que funcionem de maneira análoga (PAGLIERO et al., 2019; SELLAMI et al., 2014; VAN LIEW & MITTELSTET, 2018).

Swain e Patra (2017) compararam três técnicas de regionalização de vazão: proximidade espacial, regressão linear e similaridade física em combinação com o modelo SWAT. A pesquisa foi realizada em trinta e duas bacias hidrográficas na Índia, e os melhores resultados foram obtidos com a técnica de proximidade espacial.

Já o estudo de Lèye et al., (2020), teve o objetivo utilizar a técnica de proximidade espacial, juntamente com a modelagem hidrológica do modelo SWAT, para gerar dados na bacia não medida do rio Kayanga. Este estudo concluiu que os parâmetros calibrados e validados foram adequados para a regionalização de vazão. Mesmo que os resultados não tenham sido validados com observações, este método constitui uma solução promissora para bacias não medidas.

Em um estudo recente, Finck et al. (2024) desenvolveram uma metodologia para regionalizar vazões mínimas na bacia hidrográfica do rio Ivinhema, situada na porção sul do estado do Mato Grosso do Sul. A modelagem hidrológica, realizada com o modelo SWAT, permitiu a estimativa de vazões características como Q_{95} , Q_{90} e $Q_{7,10}$ em áreas sem dados hidrométricos. Os resultados obtidos indicaram que os modelos de regionalização propostos são adequados para a aplicação na região em estudo.

Em locais onde a disponibilidade hídrica é variável e as demandas estão aumentando, como, por exemplo, a BHRP, é fundamental gerar informações hidrológicas para subsidiar os gestores. Essas informações são cruciais para garantir uma distribuição equitativa e sustentável da água, e reduzindo o risco de escassez e as disputas pelo uso de recursos hídricos.

O objetivo deste artigo foi estimar, por meio de modelagem hidrológica, a disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Paracatu.

2.1.2 Materiais e Métodos

2.1.2.1 Área de Estudo

Na Figura 1 apresenta-se, no contexto do Brasil e da bacia hidrográfica do rio São Francisco, a representação esquemática da bacia hidrográfica do rio Paracatu (BHRP), com destaque para as estações fluviométricas Porto Extrema, Porto Alegre, Fazenda Barra da Égua e Buritizeiro, e suas respectivas áreas de drenagem.

Com área de drenagem de aproximadamente 44.642 km², a BHRP apresenta clima tropical úmido. Com precipitação anual média igual a 1.400 mm, apresenta 93% do total anual de chuvas ocorrendo de outubro a março, sendo novembro, dezembro e janeiro os meses mais chuvosos(ALTHOFF et al., 2020).

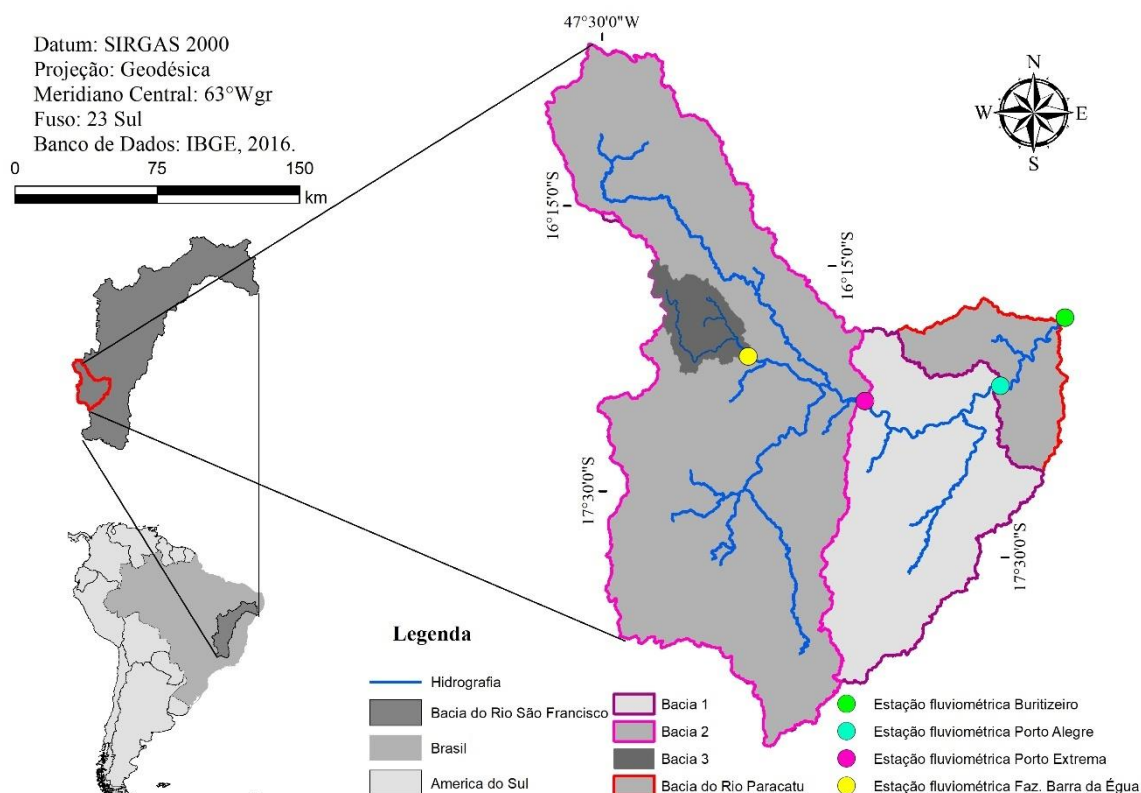


Figura 1. Bacia hidrográfica do rio Paracatu, no contexto do Brasil e da bacia hidrográfica do rio São Francisco, com destaque para as estações fluviométricas Buritizeiro, Porto Alegre, Porto Extrema, e Fazenda Barra da Água.

O período de menor precipitação ocorre entre abril e setembro (HOBBI et al., 2022; BECK et al., 2020). A evapotranspiração média anual é de 1200 mm, com temperatura média anual variando entre 22 e 24 °C (SOUZA et al., 2023; RIBEIRO et al., 2022).

A BHRP apresenta altitude variando entre 458 e 1195 metros, com 43,7 % da área de drenagem apresentando relevo suave ondulado; 23,9% da área apresenta relevo plano, 24,7% relevo ondulado, 7,08% forte ondulado e 0,62% de relevo montanhoso.

Os solos predominantes na BHRP são o Latossolo Vermelho (LV), representando 30,1% da área, seguido de Cambissolo Háplico (CX), com 24,4 %, Neossolo Litólito (RL), 23,3 %, Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), 20,6 % e Plintossolo Háplico (FX), 1,6%.

O uso e ocupação do solo da BHRP, são descritos na tabela 1, onde foram identificadas dez classes de uso solo.

Tabela 1. Classes de uso e ocupação do solo na bacia do rio Paracatu.

Classe Uso do Solo	(%) Área
Formação Florestal	7,83
Formação Savânica	29,93
Floresta Plantada	5,65
Formação Campestre	9,17
Pastagem	37,16
Lavouras Perene	0,62
Lavouras Temporárias	8,86
Área Urbana/Não Vegetadas	0,29
Mineração	0,06
Rios e Lagos	0,43

2.1.2.2 Estimativa da disponibilidade hídrica

Para simular a disponibilidade hídrica da BHRP foi utilizado o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (ARNOLD et al., 1998). O SWAT é um modelo hidrológico semi-conceitual, distribuído, estocástico e contínuo no tempo, que opera em um intervalo de tempo diário (MARARAKANYE et al., 2020). A modelagem hidrológica do SWAT é realizada com base na equação do balanço hídrico, tendo como volume de controle um perfil do solo de 2 m de profundidade (ARNOLD et al., 2012; NEITSCH et al., 2011).

A modelagem inicia-se com a divisão da bacia hidrográfica em sub-bacias e, posteriormente, a divisão dessas em Unidades de Respostas Hidrológicas (HRUs), as quais são áreas homogêneas quanto ao solo e seu uso. O escoamento superficial foi modelado usando o método do número da curva do Soil Conservation Service dos Estados Unidos (CN-SCS) (SOULIS, 2021)

2.1.2.3 Base de Dados

A base de dados necessária para simulação hidrológica com o modelo SWAT é constituída por dados tabulares e espaciais. As informações espaciais são constituídas pelos mapas de uso e cobertura do solo, tipo de solos e o modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado. Os dados tabulares constituem o banco de dados com informações quantitativas sobre clima, vegetação, solos, aquíferos, vazão, manejo, etc.

Na Figura 2 apresenta-se mapas da área de drenagem da BHRP, com destaque para as estações pluviométricas, fluviométricas e climatológicas, Figura (a), pedologia, Figura (b), relevo, Figura (c) e uso do solo, Figura (d).

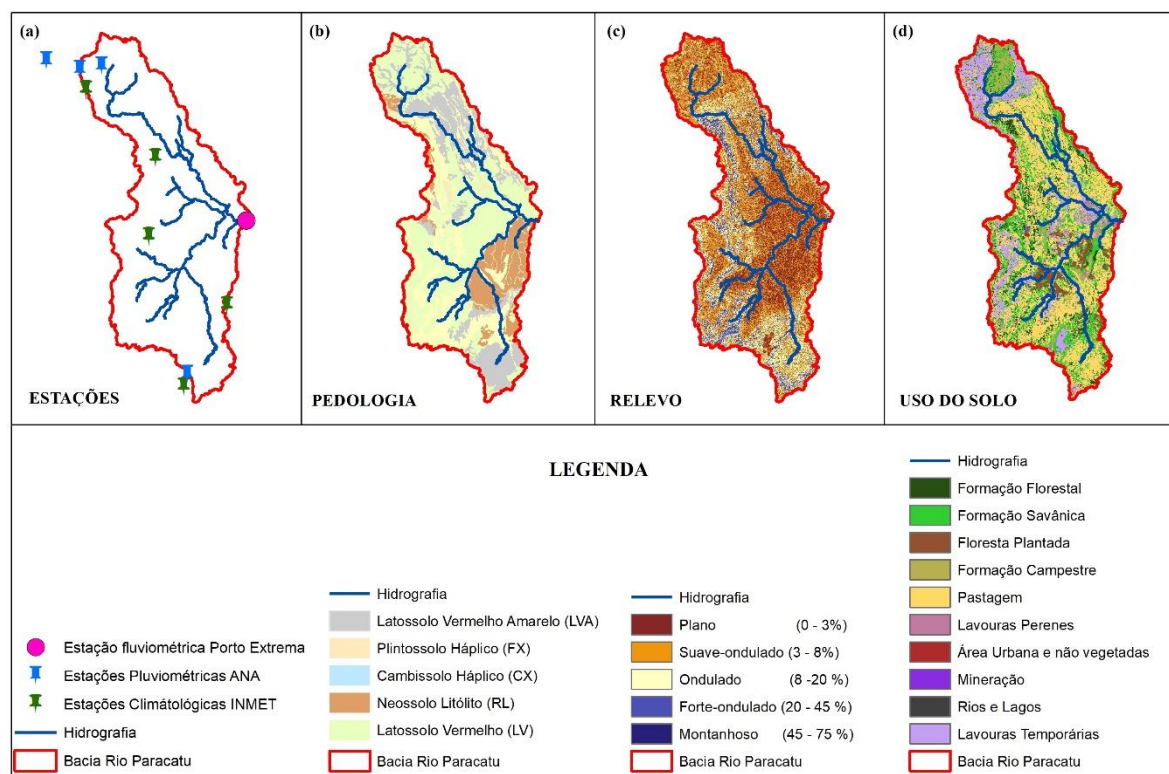


Figura 2. Mapa da área de drenagem da BHRP, com destaque para as estações pluviométricas, fluviométricas e climatológicas, Figura (a), pedologia, Figura (b), relevo, Figura (c) e uso do solo, Figura (d).

Para escolha das estações pluviométricas utilizadas na simulação, utilizou-se como critério de seleção estações localizadas a uma distância menor do que 5 km do divisor de águas da bacia. Após uma análise na base de dados da ANA (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>), foram identificadas 23 estações pluviométrica que satisfaziam a este critério. Após análise de consistência dos dados, que consistiu em eliminar as estações com mais de 10% de falhas, foram selecionadas quatro estações com série histórica de precipitação variando de 1988 a 2018, Figura 2a e Tabela 2.

Tabela 2. Estações pluviométricas e climatológicas.

Estação Pluviométrica*	Nome	Latitude	Longitude	Altitude
1547005	Brasília (Núcleo Bandeirante)	-15,78	-47,93	620
1547021	Barreiro DR-130	-15,84	-47,63	994
1547022	Rio Preto	-15,79	-47,43	928
1846005	Presidente Olegário	-18,41	-46,42	941
Estação Climatológica**	Nome	Latitude	Longitude	Altitude
A571	Paracatu	-17,24	-46,88	705
A542	Unaí	-16,55	-46,88	641
A047	Paranoá (COOPA-DF)	-16,01	-47,56	1043
A553	João Pinheiro	-17,78	-46,12	877
A562	Patos de Minas	-18,52	-46,44	950

*(<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>)

**(<https://bdmep.inmet.gov.br/#>)

Analisando-se a base de dados da ANA (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>) foram encontradas 181 estações fluviométricas disponíveis dentro da área da BHRP. Optou-se por trabalhar com estações mais próximas do exultório final, sendo selecionadas três estações fluviométricas (Figura 1a).

Para seleção das estações utilizada no trabalho, foi realizado um pré-tratamento dos dados, descartando os anos que apresentaram falhas superiores a 10% nas séries de totais anuais (AMORIM et al., 2020; JUNQUEIRA et al., 2020, 2022). Após essa análise de consistência dos dados, foram selecionadas as estações fluviométricas Porto Alegre, Porto Extrema e Barra da Égua, que apresentaram menos de 10% de falhas em dados diários. Essas três estações foram escolhidas em virtude da quantidade de dados disponíveis na série histórica e pela localização do exutório das bacias do rio Paracatu, e pelo tamanho da área de drenagem para a modelagem hidrológica em diferentes tamanhos de bacias.

A estação fluviométrica Porto Alegre, possui área de drenagem de 41.086,51km², representando 95% da área total da BHRP. Esta estação possui dados de vazão para o período de 1988 a 2018. A estação fluviométrica Porto Extrema, abrange uma área de drenagem de 29.913,09 km², o que representa 67% da área total da BHRP, com dados de vazão disponíveis para o período de 1988 a 2018. Já estação Barra da Égua, apresenta uma área de drenagem de 1.579,08 km², representando 3,54 % da área total da BHRP, e possui dados de vazão para o período de 1988 a outubro de 2016.

Para realização da calibração, primeiro optou-se por selecionar a estação fluviométrica Porto Extrema por ser a estação fluviométrica com menor quantidade de dados faltantes, em seguida foi realizada a calibração da estação Fazenda Barra da Égua por ter uma área de drenagem pequena facilitando o processamento, em seguida foi calibrado a área de drenagem da estação Porto Alegre e por último foi realizado a regionalização da vazão da BHRP.

O Modelo Hidrológicamente Condicionado (MDEHC) foi elaborado a partir dos dados do modelo digital de elevação do NASADEM, que são derivados de dados de telemetria originais da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (<https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=nasadem>) (NASA JPL, 2020). O MDEHC possui resolução espacial de 30 metros no formato *geotiff* (*Geographic Tag Image File Format*).

O mapa de solos foi obtido do portal GEOINFO (Infraestrutura de Dados Espaciais da Embrapa), no formato vetorial de *shapefile*, com escala exploratória de 1: 5.000. Esse banco de dados possui dados georreferenciados sobre valores médios de erodibilidade e de características físicas e químicas dos solos presentes no Cerrado do Brasil (https://geoinfo.cnpm.embrapa.br/layers/geonode%3Acerrados_bd1_v5b)(EMBRAPA, 2020).

O mapa de uso e ocupação do solo do ano de 2018, com resolução de 30 metros no formato *geotiff*, foi adquirido do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomas) (https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/brasil/collection-7/lcluc/coverage/brasil_coverage_2018.tif) (SOUZA et al., 2020) (Figura 2 d).

Os parâmetros físicos-hídricos utilizados para cada tipo de solo no modelo SWAT foram baseados nos trabalhos de Almeida, (2019); Pereira et al. (2016); Gomes et al. (2020). Esses parâmetros são: número de camadas do solo (NLAYER), grupo hidrológico (HYDCRP), profundidade máxima do solo (SOL_ZMX), profundidade da camada do solo (SOL_Z), densidade do solo (SOL_BD), armazenamento de água no solo (SOL_AWC), condutividade hidráulica do solo (SOL_K), teor de carbono orgânico do solo (SOL_CBN), argila do solo (CLAY), silte (SILT), areia (SAND), conteúdo de rocha (ROCK) e fator de erodibilidade do solo (USLE_K).

A evapotranspiração de referência foi estimada pelo método de Penman- Monteith (MONTEITH, 1965). Para isto foi utilizado dados diários de temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar, referente a sete estações climatológicas, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Figura 2a para o período de 1988 a 2018 (30 anos de dados) (<https://bdmep.inmet.gov.br/#>).

2.1.2.4 Discretização espacial para aplicação da modelagem

Para a aplicação do modelo SWAT, a BHRP foi dividida em sub-bacias com base no MDEHC. O valor default, sugerido pelo SWAT, foi utilizado no processo de discretização espacial da bacia em sub-bacias. Após o processamento das sub-bacias, foi feita a definição das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs).

2.1.2.5 Análise de Sensibilidade

Para otimizar o processo de calibração, é sempre interessante realizar uma análise de sensibilidade. No SWAT, a análise de sensibilidade é realizada em conjunto com a calibração.

O modelo SWAT possui vários parâmetros possíveis de serem calibrados. Quanto maior o número de parâmetros utilizados na calibração, maior o tempo computacional utilizado nas rodadas de calibração. As variações nos valores dos parâmetros em cada etapa da calibração são avaliadas para identificar aqueles que influenciam significativamente nos resultados. Os parâmetros que não têm peso significativo na geração dos resultados não serão calibrados na próxima interação.

O algoritmo SUFI-2 determina a sensibilidade dos parâmetros por meio de uma análise de regressão múltipla, sendo analisados por dois valores de dois índices: o *t-Stat* e o *p-Value*. Onde o *p-Value* determina o nível de significância do parâmetro e o *t-Stat* o grau de sensibilidade (ABBASPOUR et al., 2007; ARAZA et al., 2021). Assim, pode-se observar que um parâmetro é considerado mais sensível quando o valor absoluto de *t-Stat* é maior o *p-Value* é menor.

Para a avaliação da sensibilidade dos parâmetros foi utilizado o algoritmo SUFI-2, e os *t-Stat* e *p-Value*. O *p-Value* determina o nível de significância do parâmetro e o *t-Stat* o grau de sensibilidade (ABBASPOUR et al., 2007; ARAZA et al., 2021). Quanto maior o valor absoluto de *t-Stat* e menor o *p-Value*, mais sensível é o parâmetro.

2.1.2.6 Avaliação de desempenho do modelo

2.1.2.6.1 Calibração

A calibração deve abranger, de preferência, um período de tempo com ocorrência de grandes cheias e de estiagens prolongadas, de forma a possibilitar ao modelo a simulação

adequada das maiores e menores amplitudes possíveis de vazão (AMORIM et al., 2020; JUNQUEIRA et al., 2022).

A calibração do modelo hidrológico para a BHRP foi realizada para a estação fluviométrica de Porto Extrema (código 42690001). Na calibração, foi utilizado o período de dados de 1988 a 2008. A calibração foi feita de forma automática, utilizando o algoritmo Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2), disponível no SWAT-CUP (AHMED et al., 2022). Para analisar todas as incertezas, o algoritmo tenta capturar a maioria dos dados medidos dentro da incerteza de previsão de 95% (95PPU) do modelo em um processo iterativo. A incerteza de previsão de 95% é calculada nos níveis de 2,5% e 97,5% da distribuição cumulativa de uma variável de saída obtida por amostragem em um hipercubo latino.

O aquecimento do modelo foi realizado considerando um período de 5 anos (1983-1987). O período de aquecimento do modelo é justificado pelas grandes incertezas que se tem no início da modelagem, devido ao desconhecimento das condições iniciais, principalmente da umidade do solo. Esse período, é utilizado para que, ao iniciar a simulação, as variáveis de estado estejam livres das influências das condições iniciais.

2.1.2.6.2 Validação

O modelo foi validado para a estação fluviométrica de Porto Extrema (código 42690001). Na validação, foi utilizado o período de dados de 2009 a dezembro de 2018 (período de 10 anos) que representa 33% das amostras das vazões observadas.

2.1.2.6.3 Desempenho do Modelo

O desempenho do modelo foi avaliado a partir de métricas estatísticas para comparação dos valores simulados e observados para o conjunto de testes. As métricas adotadas foram o percentual de viés (PBIAS, Eq. 1), erro médio absoluto (MAE, Eq. 2) (ABRO et al., 2020), raiz do erro quadrático médio (RMSE, Eq.3), coeficiente de determinação (R^2 , Eq.4), índice de eficiência de Nash – Sutcliffe Efficiency (NSE, Eq.5)(NASH; SUTCLIFFE, 1970) e índice de eficiência de Kling-Gupta (KGE, Eq. 6) (GUPTA et al., 2009).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi} - Q_{simi})}{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi})} \right] \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Sim_i - Obs_i| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (Sim_i - Obs_i)^2} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Obs_i - \bar{Obs}_i) (Sim_i - \bar{Sim}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Obs_i - \bar{Obs}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Sim_i - \bar{Sim}_i)^2}} \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_i} - Q_{mean_i})^2} \quad (5)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (6)$$

sendo

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Obs_i - \bar{Obs}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Obs_i - \bar{Obs}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Sim_i - \bar{Sim}_i)^2}}$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o}$$

$$\gamma = \frac{CV_s}{CV_o} = \frac{\sigma_s / \mu_s}{\sigma_o / \mu_o}$$

em que

Q_{obs} = valor observado para o i-ésimo ponto;

Q_{sim} = valor simulado para o i-ésimo ponto;

N = número total de pontos;

Sim_i = valor simulado para o i-ésimo ponto;

Obs_i = valor observado para o i-ésimo ponto;

n = número de observações;

Na tabela 3 apresenta-se valores dos limiares estatísticos que foram considerados como diretriz de interpretação do desempenho da modelagem hidrológica (MARARAKANYE et al., 2020).

Tabela 3. Valores de limiar estatísticos para interpretação do desempenho do modelo.

Avaliações de desempenho	R^2	NSE	PBIAS
Muito bom	$> 0,7 - 1$	$> 0,75 - 1$	$< \pm 10$
Bom	$> 0,6 - 0,7$	$> 0,65 - 0,75$	$\pm 10 \pm 15$
Satisfatório	$> 0,5 - 0,6$	$> 0,50 - 0,65$	$\pm 15 \pm 25$
Insatisfatório	$\leq 0,5$	$\leq 0,50$	$\geq \pm 25$

(MARARAKANYE et al., 2020 and N. MORIASI et al., 2007)

2.1.2.6.4 Regionalização de vazão

A disponibilidade hídrica em sub-bacias não monitoradas da BHRP, foi estimada por meio de técnica de regionalização de vazão (DUARTE et al., 2024; JAHANSHAHI et al., 2022; ODUSANYA et al., 2022).

Para isso, utilizou-se o modelo calibrado e validado para a estação fluviométrica de Porto Extrema (código 42690001). A precipitação foi espacializada na área de drenagem da BHRP utilizando o inverso da distância ponderada (ALMEIDA et al., 2024; CHEN; LIU, 2012). Os dados climáticos também são interpolados pela técnica inverso da distância ponderada.

2.1.3 Resultados e Discussão

2.1.3.1 Base de Dados

Na Figura 3 apresenta-se a média mensal das variáveis climáticas observadas das estações meteorológicas da BHRP para os períodos de 1988 a 2018. A umidade relativa média do ar (UR) variou de 42,5% a 62,6%, com o valor máximo igual a 96,9%%, no mês de dezembro, e mínimo igual a 25,3% em agosto. A velocidade média do vento variou de 0,99 m/s a 1,33 m/s, com valor máximo de 4,95 m/s, no mês de agosto e mínimo igual a 0,15 m/s, em junho.

A radiação solar média variou de 15,11 MJ/m²/dia a 16,5 MJ/m²/dia, com valor máximo igual a 30,98 MJ/m²/dia, no mês de dezembro e mínimo igual 4,94 MJ/m²/dia, em julho. A

temperatura máxima média variou de 22°C a 25°C, com valor máximo igual a 41° C no mês de outubro, e mínimo igual a 17°C, em julho. A temperatura mínima média variou de 11°C a 15°C, com valor máximo igual a 27°C no mês de outubro, e mínimo igual 4°C, em julho. A precipitação média variou de 1,25 a 30,80 mm, com valor máximo igual a 170 mm, e mínima igual a 0 mm, em julho.

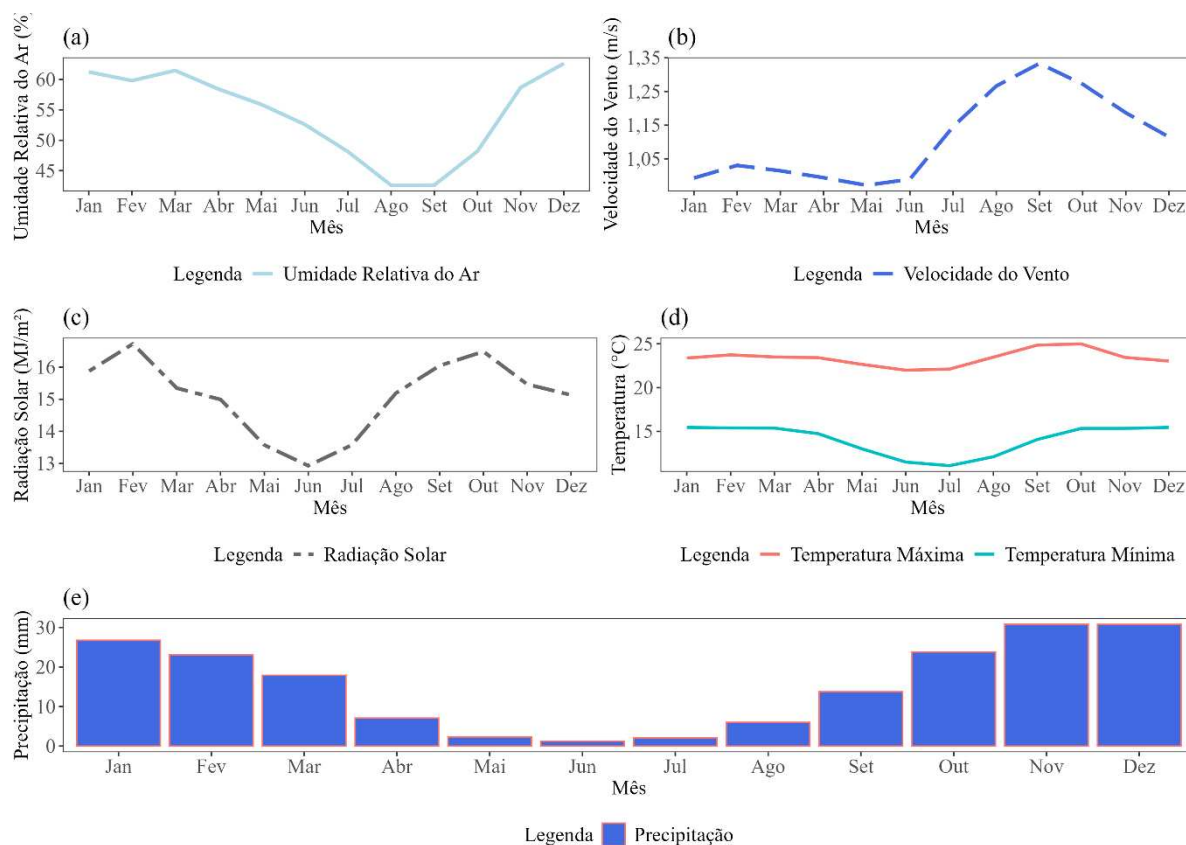


Figura 3. Variáveis climáticas médias mensais observadas da BHRP para o período de 1988 a 2018.

2.1.3.2 Análise de sensibilidade, calibração e validação do SWAT

Os parâmetros GWQMN, GW_REVAP.gw, REVAPMN.gw, SHALLST_N.gw, ALPHA_BF.gw, representando a água subterrânea, CN2.mgt, o escoamento superficial, ESCO.hru, a evaporação, SHALLST_N.gw, as características topográficas, SOL_K.sol, características do solo, e SHALLST_N.gw, representando a concentração de nitrogênio, foram selecionados para a análise de sensibilidade.

O resultado da análise de sensibilidade indicou que os parâmetros SOL_K, GW_REVAP, CN2 e ESCO foram mais sensíveis, ou seja, aqueles parâmetros cuja a variação no seu valor mais variou o resultado (Tabela 5).

Na tabela 4 apresenta-se os valores obtidos no processo de calibração referentes aos oito parâmetros avaliados.

Tabela 4. Intervalos de variação e valores calibrados dos parâmetros da bacia do rio Paracatu.

Parâmetro	<i>t-Stat</i>	Intervalo		Valor obtido
		Mínimo	Máximo	
r__EPCO.hru	0,77	0,10	0,50	0,228
r__REVAPMN.gw	1,11	0,00	250,00	214,750
v__SOL_K.sol	98,96	1,00	2000,00	242,879
r__ALPHA_BF.gw	0,69	-0,10	0,60	-0,003
v__GW_RE-VAP.gw	11,72	0,02	0,2	0,177
a__GWQMN.gw	4,19	1,00	5000,00	3,165,367
v__ESCO.hru	29,87	0,01	0,9	0,153
r__CN2.mgt	15,60	-0,50	0,05	-0,338

r__EPCO.hru = coeficiente de absorção de água pelas plantas; r__REVAPMN.gw = Profundidade mínima de água no aquífero raso para que ocorra o processo de evaporação; v__SOL_K.sol = condutividade hidráulica saturada do solo; r__ALPHA_BF.gw = fator alfa do fluxo de base; v__GW_REVAP.gw = coeficiente de evaporação da água subterrânea; a__GWQMN.gw = Profundidade limite de água no aquífero raso necessária para que o fluxo de retorno ocorra; v__ESCO.hru = Fator de compensação de evaporação da água do solo; r__CN2.mgt = Número da curva de escoamento SCS para condição de umidade II.

O parâmetro SOL_K, que representa a condutividade hidráulica saturada do solo, foi o parâmetro que apresentou maior sensibilidade com valor de *t-Stat* de 98,96. Uma redução de 95% no valor desse parâmetro, por exemplo passando de 2000 (mm.h-1) para o valor de 242,87 (mm.h-1). A condutividade hidráulica controla a taxa de infiltração da água no solo, influenciando diretamente processos como escoamento superficial, recarga de aquíferos e evapotranspiração (BUSICO et al., 2020; WANG et al., 2014).

Mendes (2021) analisando a hidrologia na bacia do rio das Velhas, localizado a sudeste do rio Paracatu, no bioma cerrado, obteve o valor de *t-Stat* igual de 5,75 cerca de 94,2 % menor que o encontrado neste trabalho; já Silva (2016) analisando a hidrologia da bacia do rio Preto, afluente do rio Paracatu, localizado na região noroeste, encontrou um valor de *t-Stat* de 10,76 cerca de 89,2% menor que o encontrado neste trabalho.

Para o parâmetro ESCO, relacionado à evaporação do solo, o *t-Stat* foi igual a 29,87. O valor desse parâmetro apresentou uma redução de 83% no seu valor inicial, passando de 0,9 para 0,15. Essa redução indica uma diminuição na perda de água por evaporação, influenciando

diretamente o balanço hídrico da bacia e outros processos, como, por exemplo, o escoamento superficial e a infiltração (DASH et al., 2021; SHAH et al., 2021). Mendes (2021) obteve o valor de *t-Stat* igual a 10,14 para parâmetro ESCO, cerca de 66,1% menor que o encontrado neste trabalho. Eger et al. (2021), analisando a hidrologia do rio Urucuia no oeste da Bahia, obtiveram o valor de *s-stat* igual a 4,41, cerca de 85,2% menor que o encontrado neste trabalho.

Mendes (2021) obteve o valor de *t-Stat* de 10,14 para parâmetro ESCO, cerca de 66,05% menor que o encontrado neste trabalho, enquanto Eger et al. (2021), analisando a hidrologia do rio Urucuia no oeste da Bahia obtiveram o valor de *t-Stat* de 4,41 cerca de 85,24% menor que o encontrado neste trabalho.

O parâmetro CN2, que representa o valor inicial do número da curva do SCS, apresentou o valor de *t-Stat* igual a 84,4. O valor desse parâmetro passou de 0,5 para 0,17, redução de 34%. Essa redução indica uma diminuição na capacidade do solo de gerar escoamento superficial, influenciando diretamente a quantidade de água para o rio (HARDANTO et al., 2023; VERGARA et al., 2021).

Mendes (2021) obteve um valor de *t-Stat* igual a 26,89 para o parâmetro CN2, cerca de 47,8% maior que valor encontrado neste trabalho. Eger et al. (2021) encontraram o valor de *t-Stat* de 0,75 para o parâmetro CN2, sendo 97,5% menor que o valor encontrado neste trabalho.

Por fim, O parâmetro GW_REVAP, relacionado à taxa de evaporação da água subterrânea, apresentou o valor de *t-Stat* igual a 88,3. O valor desse parâmetro apresentou uma redução de 3% no seu valor inicial, passando de de 0,2 para 0,17. Esse parâmetro é influenciado por fatores como nível do lençol freático, tipo de solo e condições climáticas. Silva et al. (2018) analisando a hidrologia na bacia do rio São Francisco, rio o qual a BHRP é afluente, encontraram o valor de *t-Stat* igual a 46,39, cerca de 295,7 % maior que o valor obtido neste trabalho. Eger et al. (2021) encontraram o valor de *t-Stat* igual a 1,80, cerca de 84,6% menor que o valor obtido neste trabalho.

Na BHRP, observou-se que grande parte da precipitação foi incorporada nas águas subterrâneas no aquífero confinado e no aquífero raso e não confinado, contribuindo no abastecimento da rede fluvial mais a jusante.

Durante o processo de calibração do modelo, nem todos os parâmetros identificados como sensíveis na análise de sensibilidade foram modificados. Por exemplo, os valores mínimos (0,02) e máximo (0,2) do parâmetro GW_REVAP não foram alterados.

Após a calibração, o parâmetro ALPHA_BF, que representa a recessão do fluxo de base, apresentou valor igual a -0,003 dias. Esse parâmetro difere do valor encontrado por Lopes et al. (2021) de 0,53 dias para a bacia do rio Alto Teles Pires, localizado no bioma Cerrado, a

Noroeste da bacia do rio Paracatu. O valor baixo desse parâmetro (-0,003) sugere que a região da BHRP possui aquíferos profundos ou solos muito permeáveis, conforme relatado nos estudos de Vasconcelos, (2014) Vasconcelos et al. (2013).

O valor do parâmetro EPCO, que representa perda de água por evaporação em corpos d'água foi igual 0,228. Analisando a hidrologia da bacia do rio das Velhas, Mendes (2021) obteve para esse parâmetro valor igual a 1. Essa diferença de 77% indica que o rio das velhas apresentou maior evaporação dos corpos d'água do que a BHRP.

O parâmetro REVAPMN representa a profundidade mínima da água no solo para que ocorra a elevação da água na zona não saturada do solo. O valor obtido para este parâmetro foi igual a 214,8 mm. Amorim et al. (2020) analisando a hidrologia da bacia hidrográfica do rio da Serra da Mesa localizado ao norte da bacia do rio Paracatu, obtiveram valor igual a 320,1 mm cerca de 33% maior que o valor encontrado neste trabalho.

O parâmetro GWQMN representa a profundidade do limite da água no aquífero raso, que é um fator crucial para o fluxo de retorno. Valores elevados indicam que o fluxo de base será menor tendo menor que vazão do rio, principalmente no período seco. Em contrapartida, valores baixos resultam em maior produção do escoamento de base e, conseqüentemente, em maior vazão do rio (SHAIKH et a., 2022; ABBASPOUR et al., 2019).

O valor obtido para este parâmetro foi igual a 3165,4mm. Silva, (2016) analisando a hidrologia da bacia do rio Preto, subbacia da bacia do rio Paracatu, obtiveram valor igual a 3700 mm, 14,5% maior que o obtido neste trabalho.

O parâmetro GW_REVAP representa o coeficiente de ascensão da água à zona não saturada do solo e é utilizado como uma constante de proporcionalidade para calcular a quantidade máxima de água que se move no solo (DURÃES, 2010; GALBETTI, 2021). O valor obtido para este parâmetro foi igual a de 0,17.

Lopes et al. (2021) analisando a hidrologia na bacia do rio Alto Teles Pires no bioma Cerrado a Noroeste da bacia do rio Paracatu, obtiveram o valor de 0,12 cerca de 29,4% menor que o encontrado neste trabalho.

O parâmetro CN2 representa a quantidade de escoamento superficial gerada após um evento de precipitação. É um parâmetro importante na aplicação do método SCS Curve Number para cálculo do escoamento superficial (MINGOTI, 2012). Esse parâmetro determina a quantidade de água que esco superficialmente na bacia hidrográfica (MENDES, 2021).

O valor obtido por esse parâmetro foi igual a -0,338. Ferrigo (2014) analisando a hidrologia da bacia do Lago do Descoberto obteve o valor igual a -0,23 sendo 31,95% maior que o valor encontrado neste trabalho.

O parâmetro ESCO representa o fator de compensação de evaporação do solo e tem um papel crítico no processo de evapotranspiração (PEREIRA, 2013). O valor atribuído a esse parâmetro representa um percentual aplicado à evaporação da camada superior do solo, onde percentuais mais elevados indicam uma maior taxa de evaporação.

O valor obtido por esse parâmetro foi igual a 0,153. Castro et al. (2016) avaliando a hidrologia da bacia do Alto Rio Jardim, obtiveram valor 0,01, 3,46% menor que o valor encontrado neste trabalho. Embora alguns autores (FERRIGO, 2014; SILVA, 2016) tenham, destacado que o parâmetro ESCO tem maior influência sobre a vazão quando o valor está próximo do seu máximo, nesta calibração o valor calibrado influenciou positivamente no NSE, que aumentou de 0,30 para 0,39, o que indica uma melhoria na precisão do modelo.

O parâmetro SOL_K representa a condutividade hidráulica do solo saturado, sendo um elemento essencial para o cálculo do tempo de percolação da água entre camadas do solo (SERRÃO et al., 2019; SERRÃO, 2018). O valor obtido para esse parâmetro foi de 30,98 mm h⁻¹, aproximadamente 38,04% inferior ao valor reportado por Silva (2016), que avaliou a hidrologia da bacia do rio Preto, localizada na região noroeste da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba (BHRP), e obteve um valor de 50,00 mm h⁻¹.

Na tabela 5 apresenta-se as estatísticas obtidas na calibração e na validação do modelo para a estação fluviométrica Porto Extrema.

Tabela 5 – Estatísticas obtidas na calibração e na validação do modelo para a estação fluviométrica Porto Extrema.

Estação	Período	Coeficiente Estatístico					
		Pbias	MAE	RMSE	R ²	NSE	KGE
Porto Extrema	Calibração	-7,0000	118,8568	174,8429	0,7165	0,6874	0,8314
	Validação	2,9000	63,6990	88,5265	0,8227	0,8206	0,8409

Analisando a tabela 6, observa-se que o valor de NSE foi igual a 0,69, na calibração, e 0,82, na validação. De acordo com Moriasi et al., (2007) e um NSE acima de 0,5 indica que, para modelos hidrológicos, o desempenho satisfatório para calibração e muito para a validação.

Durães et al. (2011) avaliaram o desempenho do modelo SWAT na simulação de processos hidrológicos na bacia do rio Paraopeba, localizada no bioma Cerrado, com área de drenagem de 10.200 km², situada a Sudeste da bacia do rio Paracatu. Nesse estudo, os autores obtiveram NSE igual a 0,79 para a calibração e validação, representando um aumento de 12,6% na calibração e uma redução de 3,6% na validação dos valores encontrados neste trabalho.

Mendes (2021) avaliou o desempenho do modelo SWAT na simulação de processos de chuva-vazão na bacia do rio das Velhas, localizada na região sul da bacia do rio São Francisco, com área de drenagem de 29.173 km². O autor obteve o valor de NSE de 0,67 para calibração e 0,75 para validação representando uma redução de 3 % e de 10,7% na validação em relação aos valores encontrados neste estudo.

O coeficiente de determinação de Pearson (R^2) indica maior correlação entre os valores observados e simulados, sendo que valores mais próximos de 1 indicam uma maior correlação entre a vazão simulada e a vazão observada (TEODORO et al., 2020). Na calibração, o modelo apresentou um R^2 igual a 0,72, enquanto na validação, esse valor foi de 0,82, indicando um bom desempenho na simulação do comportamento hidrológico da BHRP.

Mendes (2021) obteve o valor de R^2 de 0,70 na calibração e 0,79 na validação, valores próximos com sendo menor 2% na calibração e 3,6% menor na validação quando comparados aos resultados da tabela 6. Fukunaga et al. (2015) avaliou o desempenho da bacia do rio Itapemerim localizado a oeste da BHRP, com área de drenagem de 2.237 km², obtiveram valor de R^2 de 0,76 na calibração e 0,63 na validação, sendo 5,6% maior na calibração e 23,17% menor na validação em relação aos valores encontrados neste estudo.

O PBIAS obtido foi igual a 7,0% e -2,9%, na calibração e validação, respectivamente. Essa métrica representa uma medida percentual, que compara a diferença entre a média simulada e a média observada em relação à média observada (RAUTELA et al., 2022). Um valor próximo de zero indica que a média simulada está próxima da média observada, enquanto valores positivos indicam superestimação e valores negativos indicam subestimação da vazão.

Na calibração, o modelo subestimou a vazão em 7%, enquanto na validação superestimou em 2,93%, mas em geral os resultados foram considerados satisfatórios, principalmente na validação, onde o valor de PBIAS se aproximou de zero.

Oliveira et al. (2019), avaliou a hidrologia da bacia do rio Paranaíba, localizado a sudeste da BHRP com área de drenagem de 3.754 km², obtiveram valor de PBIAS de -4,5% na calibração e -3,5% na validação, sendo 2,5% menor na calibração e 1% menor na validação quando comparados ao valores da tabela 6. Mendes (2021) obteve o valor de PBIAS de -5,10% na calibração e 9,5% na validação, sendo 1,9% menor na calibração e 6,6% maior na validação.

Na calibração e validação, o MAE foi igual a 118,9 e 63,7, respectivamente. O MAE é uma métrica não negativa que serve para avaliar a precisão de um modelo, expressando a média dos erros absolutos entre os dados simulados e observados na mesma unidade de medida (REN et al., 2018). Os valores obtidos neste trabalho, embora distantes de zero, são satisfatórios

(MARARAKANYE et al., 2020; MORIASI et al., 2007), indicando uma boa precisão do modelo para simular a vazão nessa bacia hidrográfica.

Uliana et al. (2019) avaliaram o desempenho do modelo SWAT na simulação de processos hidrológicos na bacia do Piracicaba, localizada a sudeste da BHRP, com área de drenagem de 5.304,0 km², e obtiveram o valor de MAE de 6,4 na calibração e 5,0 na validação, cerca de 94% menor na calibração e 63,7% menor na validação, quando comparados aos valores do MAE na tabela 6.

O RMSE mede a magnitude do erro médio entre os dados observados e os simulados. Neste estudo, os valores obtidos para o RMSE foram de 174,8 na fase de calibração e de 88,5 na fase de validação. Uliana et al. (2019) obtiveram o valor de RMSE de 12,8 na calibração, enquanto na validação o valor obtido foi de 12,1 representando uma redução de 99% na calibração e 86% na validação, em comparação com os resultados deste trabalho. Fukunaga et al., (2015) obtiveram o valor de RMSE de 1,18 na calibração e 0,50 na validação cerca de 99,34%, valores aproximadamente 99,44% inferiores aos encontrados no presente estudo.

Zanin et al. (2018), avaliaram a hidrologia da bacia Rio Preto, localizada no norte do estado de Santa Catarina, região sul do Brasil, com área de drenagem de 965,8 km². Os autores obtiveram um valor de MAE de 2,48 para a calibração e 1,49 para validação, representando reduções de aproximadamente 98,58% e 98,32%, respectivamente, em comparação aos valores desse estudo.

2.1.3.3 Disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Paracatu

Na Figura 4 apresenta-se os resultados da vazão observada e simulada nos períodos de calibração e validação.

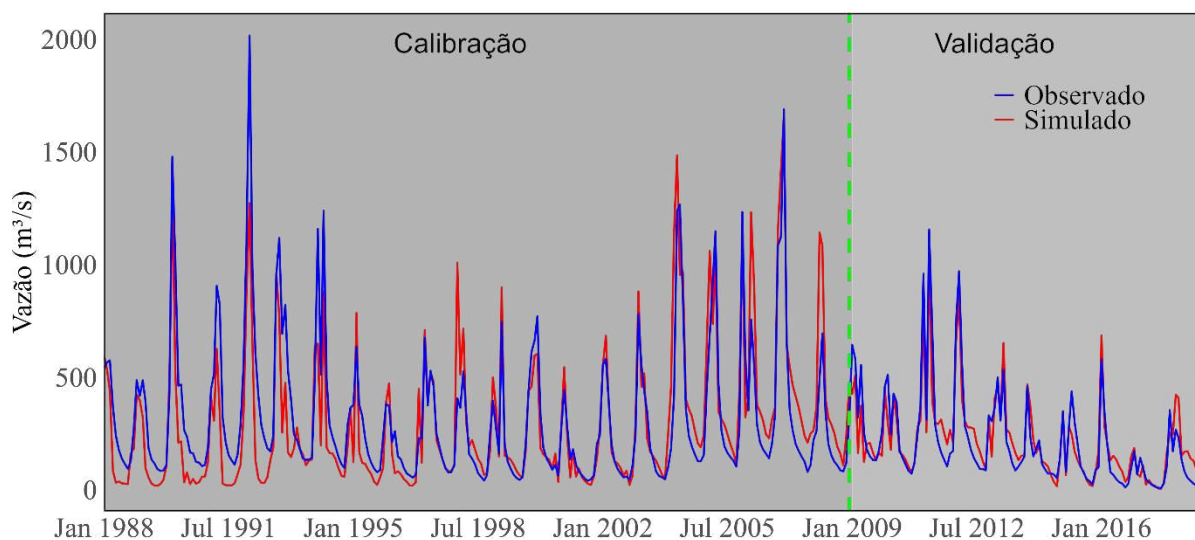


Figura 4. Vazão observada e simulada para o exutório da estação Porto Extrema.

No período de calibração, o modelo subestimou a vazão observada em 55% do tempo com uma diferença média no volume igual $22,71 \text{ m}^3/\text{s}$, 7%. Na validação, o modelo superestimou a vazão observada em 60%, com uma diferença média de $6,4881 \text{ m}^3/\text{s}$, 2%. A maior superestimava da vazão, foi igual a 356%, observada em agosto de 2018, e o menor valor subestimado foi observado em outubro de 2014.

O modelo SWAT após ser calibrado e validado, foi utilizado para estimar a disponibilidade hídrica mensal média no exutório da estação fluviométrica Porto Extrema, para o período de 1988 a 2018. A vazão média anual foi igual a $278,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Analisando a curva de permanência, observou-se que em 95% do tempo a vazão foi igual ou maior que $26,61 \text{ m}^3/\text{s}$.

A vazão máxima no mês de janeiro foi de $1422 \text{ m}^3/\text{s}$ para o ano de 2007, enquanto a vazão mínima no mesmo mês foi de $65,94 \text{ m}^3/\text{s}$ para o ano de 2015. Em fevereiro a vazão máxima foi igual a $1666 \text{ m}^3/\text{s}$, no ano de 2007, e a vazão mínima igual a $56,27 \text{ m}^3/\text{s}$, no ano de 2001. No mês de março, a vazão máxima foi igual a $1233 \text{ m}^3/\text{s}$ para o ano de 2006, enquanto a vazão mínima foi igual a $74,71 \text{ m}^3/\text{s}$ para o ano de 1996.

Em abril, a vazão máxima registrada foi de $967,5 \text{ m}^3/\text{s}$, no ano de 2004, enquanto a vazão mínima foi de $23,27 \text{ m}^3/\text{s}$, em 2017. No mês de maio, a vazão máxima foi igual $465,4 \text{ m}^3/\text{s}$, no ano de 2007, enquanto a vazão mínima foi igual a $28,83 \text{ m}^3/\text{s}$, para o ano de 1991. Em junho, a vazão máxima foi igual a $416,8 \text{ m}^3/\text{s}$, para o ano de 2007, enquanto a vazão mínima foi igual a $19,93 \text{ m}^3/\text{s}$, para o ano de 1989.

No mês de julho, a vazão máxima foi de 368,8 m³/s, em 2007, enquanto a vazão mínima foi igual a 18,84 m³/s, no ano de 1989. Para o mês de agosto, a vazão máxima foi igual a 239,8 m³/s, para o ano de 2007, enquanto a vazão mínima foi igual a 7,25 para o ano de 2017. No mês setembro a vazão máxima foi igual a 239,8 m³/s, para o ano de 2007, enquanto a vazão mínima foi de 5,78 m³/s, para o ano de 2017.

Em de outubro, a vazão máxima atingiu o valor de 313,1 m³/s, em 2006, e a vazão mínima de 17,25 m³/s, no ano de 2014. No mês de novembro, a vazão máxima atingiu o valor de 965,2 m³/s, em 1992, enquanto a vazão mínima registou 60,21 m³/s, em 1990. No mês de dezembro, a vazão máxima atingiu o valor de 1323 m³/s, no ano de 1989, enquanto a vazão mínima atingiu o valor de 120,9 m³/s, em 1996.

A Figura 5 apresenta o gráfico de dispersão com valores das vazões simuladas e observadas da série histórica (1988-2018) para a estação fluviométrica Porto Extrema.

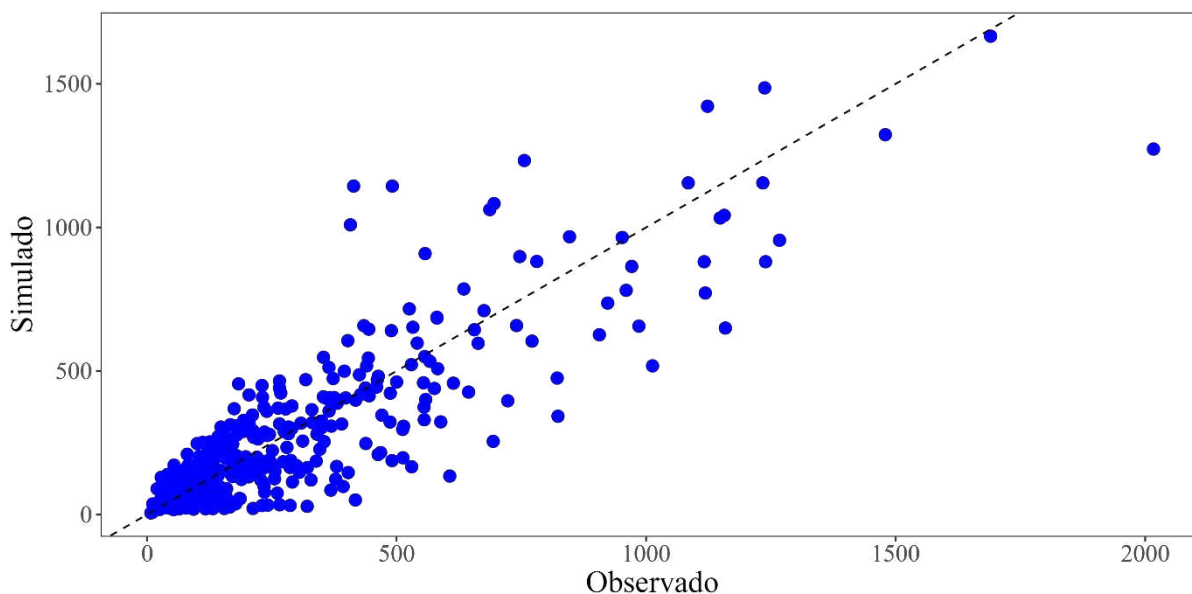


Figura 5. Gráfico de dispersão de vazões observadas e simuladas para estação Porto Extrema.

Na figura 5, é possível observar que a vazão simulada superestima e subestima a vazão. Os pontos em vermelho (vazão simulada) que estão que estão acima da linha preta pontilhada (linha de 45 graus) indicam que os valores simulados são maiores que os valores observados correspondentes, caracterizando uma superestimação em relação aos valores observados. Por outro lado, os pontos situados abaixo da linha preta pontilhada indicam subestimação dos valores simulados em relação aos valores observados.

Na Figura 6, são apresentados os resultados da vazão simulada por meio da regionalização para o período de 1988 a 2018 para a BHRP.

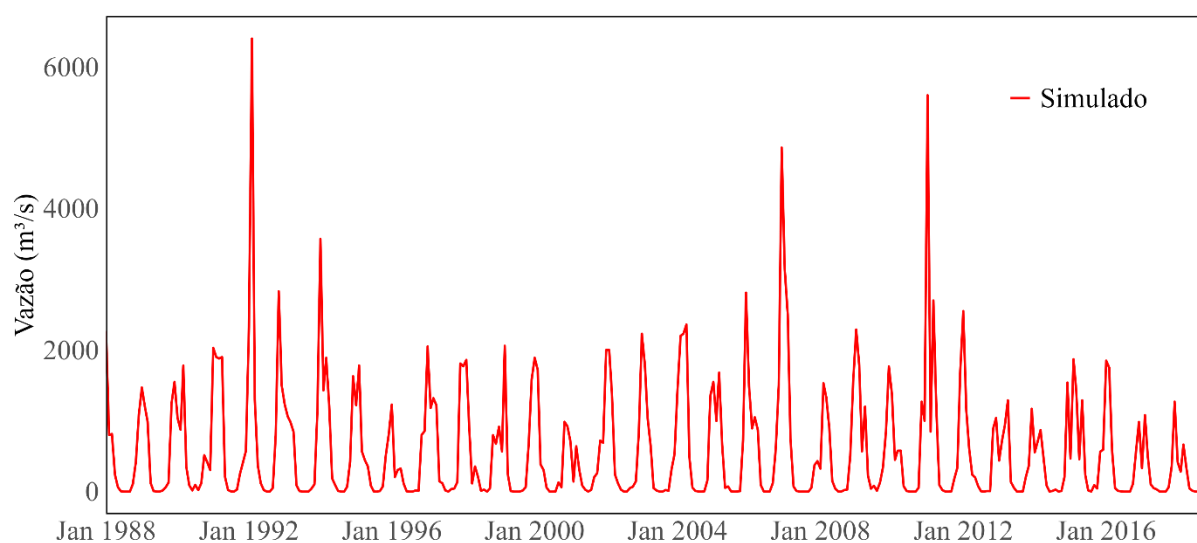


Figura 6. Vazão simulada pela regionalização de vazão para a bacia hidrográfica do rio Paracatu.

A partir modelo SWAT calibrado, foi realizado a disponibilidade hídrica mensal média para BHRP, para o período de 1988 a 2018. A vazão média anual foi igual a 601,0242 m³/s.

A vazão máxima no mês de janeiro foi de 5.600 m³/s para o ano de 2011, enquanto a vazão mínima no mesmo mês foi de 324 m³/s para o ano de 2008. Em fevereiro a vazão máxima foi igual a 6400 m³/s, no ano de 1992, e a vazão mínima igual a 141 m³/s, no ano de 2001. No mês de março, a vazão máxima foi igual a 2700 m³/s para o ano de 2011, enquanto a vazão mínima foi igual a 304 m³/s para o ano de 1996.

Em abril, a vazão máxima registrada foi de 2360 m³/s, no ano de 2004, enquanto a vazão mínima foi de 47,80 m³/s, em 2016. No mês de maio, a vazão máxima foi igual 1290 m³/s, no ano de 2015, enquanto a vazão mínima foi igual a 6,36 m³/s, para o ano de 1989. Em junho, a vazão máxima foi igual a 237 m³/s, para o ano de 2015, enquanto a vazão mínima foi igual a 0 m³/s, para o ano de 2007.

No mês de julho, a vazão máxima foi de 94,3 m³/s, em 1990, enquanto a vazão mínima foi igual a 0 m³/s, no ano de 1988. Para o mês de agosto, a vazão máxima foi igual a 27,9 m³/s, para o ano de 2014, enquanto a vazão mínima foi igual a 0 para o ano de 1988. No mês setembro a vazão máxima foi igual a 205 m³/s, para o ano de 2001, enquanto a vazão mínima foi de 0 m³/s, para o ano de 1988.

Em de outubro, a vazão máxima atingiu o valor de 789 m³/s, em 1992, e a vazão mínima de 2,97 m³/s, no ano de 2004. No mês de novembro, a vazão máxima atingiu o valor de 2830 m³/s, em 1992, enquanto a vazão mínima registou 103 m³/s, em 1993. No mês de dezembro, a

vazão máxima atingiu o valor de 4860 m³/s, no ano de 1989, enquanto a vazão mínima atingiu o valor de 304 m³/s, em 1996.

A regionalização indicou a ocorrência de valores de vazão mensal iguais a zero durante os meses do período seco do ano. A quantidade de registros de vazão nula foi de 3 ocorrências no mês de junho, 13 no mês de julho, 18 no mês de agosto e 8 no mês de setembro.

Os resultados demonstraram uma variação sazonal expressiva nas vazões, com valores máximos registrados nos meses chuvosos, como janeiro (5.600 m³/s em 2011) e fevereiro (6.400 m³/s em 1992), e valores mínimos nos meses do período seco, como agosto e setembro, quando foram observadas vazões iguais a zero. O estudo identificou 42 registros de vazões mensais iguais a zero durante os meses secos, sendo 3 em junho, 13 em julho, 18 em agosto e 8 em setembro, ressaltando a redução crítica da disponibilidade hídrica nesses períodos.

2.1.4 Conclusões

A calibração e validação obteve desempenho satisfatório para com valores de NSE de 0,69 na calibração e 0,82 na validação, acima dos limiares de 0,5 estabelecido como aceitável para modelos hidrológicos. Os parâmetros mais sensíveis, como SOL_K, GW_REVAP, CN2 e ESCO, tiveram impactos significativos na calibração do modelo, refletindo processos hidrológicos importantes como a infiltração, evaporação e geração de escoamento superficial.

A estimativa da disponibilidade hídrica por meio da modelagem hidrológica para a bacia hidrográfica do rio Paracatu, apresentou resultado insatisfatório, devido apresentar repentinamente vazões com valores zero, com 42 repetições para os meses de junho, julho agosto e setembro.

2.2 Avaliação de produtos de precipitação na estimativa da disponibilidade hídrica

Resumo

O bioma Cerrado engloba 24% do território brasileiro. Cerca de 70%, dos seus 204 milhões de hectares, possuem potencial para o desenvolvimento da agricultura. O crescimento da demanda hídrica observada nos últimos anos, advinda, em parte, tanto do aumento das áreas irrigadas como do aumento da variabilidade do clima, tem contribuído para o aumento das disputas pelo uso de recursos hídricos. Esse cenário indica a necessidade de desenvolvimento de planejamentos cada vez mais estratégicos, com vista ao desenvolvimento sustentável da região, que depende de informações sobre a disponibilidade hídrica. Nesse contexto, modelos hidrológicos são ferramentas fundamentais para simular cenários de disponibilidade hídrica; porém, a escassez de dados hidroclimáticos na região do Cerrado tem dificultado a aplicação desses modelos. Pesquisas recentes têm sugerido, como alternativa a essa falta de dados, o uso de produtos de precipitação. Uso desses produtos na região do Cerrado, entretanto, precisam ser mais bem avaliados. Nesse contexto, foi objetivo deste trabalho avaliar a acurácia de diferentes produtos de precipitação na estimativa da disponibilidade hídrica por meio da modelagem hidrológica. Para a avaliação dos produtos de precipitação foram utilizados cinco bancos de dados, sendo um obtido a partir de reanálise (ERA5) e quatro de produtos de precipitação originados por satélite (GPCC, CHIRPS v2.0, PERSIANN-CDR e MSWEP). Área de estudo foi a bacia hidrográfica do rio Paracatu. Para modelagem hidrológica foi utilizado o modelo SWAT (Soil & Water Assessment Tool). As simulações foram realizadas para o período de 1988 a 2018. O produto com melhor desempenho foi o GPCC, seguido do ERA5, CHIRPS v2.0, PERSIANN-CDR e o MSWEP. Os dados provenientes do MSWEP foram os que apresentaram a melhor correlação com os dados observados, com um valor de 0,39; no entanto, ele foi o que apresentou o pior desempenho na simulação da disponibilidade hídrica. Os dados do CHIRPS, ERA 5, GPCC 7.0 e PERSIANN-CDR apresentaram valores de correlação iguais a 0,29, 0,32, 0,23 e 0,25, respectivamente. Entre os produtos de precipitação avaliados na estimativa da disponibilidade hídrica, o GPCC 7.0 foi o que apresentou o melhor desempenho, seguido pelo ERA5 e CHIRPS, que obtiveram desempenho bons.

Palavras Chaves: Agricultura Irrigada, Recursos Hídricos, Escassez Hídrica.

2.2.1 Introdução

A savana brasileira (Cerrado) abrange aproximadamente 24% do território brasileiro (BOLFE et al., 2020) e sua produção representa cerca de 60 % da produção agrícola brasileira (CAVALCANTE, 2019; RODRIGUES; ZACCARIA, 2020). Nos últimos anos, entretanto, tem-se observado, em algumas bacias hidrográficas dessa região, um aumento das disputas pelo uso da água, o que pode vir a comprometer o desenvolvimento sustentável da região.

Regiões como a do Cerrado, onde a agricultura é a base da economia e a disponibilidade hídrica é incerta, é fundamental adotar estratégias de desenvolvimento baseadas em planejamento estratégico, que utilizem abordagens multidisciplinares e trabalhadas de forma integrada entre os setores (RODRIGUES; DOMINGUES, 2017).

Cenários indicativos da disponibilidade hídrica, em escala de bacia hidrográfica, são instrumentos importante do planejamento estratégico que vise o desenvolvimento sustentável de uma região. Utilizando esses cenários, construídos com bases em probabilidade de ocorrência, os gestores podem prever com maior assertividade o resultado de determinada intervenção.

Cenários são, via de regra, construídos por meio de modelos matemáticos que dependem de séries históricas de dados hidroclimáticos. A carência desses dados, entretanto, para a região do Cerrado tem limitado a utilização desses modelos e, conseqüentemente, dificultado a inclusão desses cenários nos planos de desenvolvimento, o que, muitas vezes, leva à simplificações nas tomadas de decisão, trazendo incertezas ao planejamento e à gestão de recursos hídricos de bacias hidrográficas do bioma (RODRIGUES; SCHULER, 2016).

A precipitação tem grande influência no comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, sendo fundamental a sua correta estimativa (ARKIN, 1979; MARINHO FILHO et al., 2013). A sua variabilidade espacial, entretanto, é um problema para a modelagem e para a gestão de recursos hídricos, principalmente de pequenas bacias hidrográficas em regiões como a do Cerrado. Para superar a limitação e falta desses dados, produtos de precipitação são uma alternativa promissora. Esses produtos têm sido largamente utilizados devido a sua cobertura quase global e alta resolução espaço-temporal (AHMED et al., 2022; TAN et al., 2018).

Existem diversos produtos de precipitação disponíveis para estimativa da precipitação. Parte desses produtos são provenientes de dados de reanálise (ERA5, MERRA-2, JRA-55, CFSR), outra parte combinam dados de sensoriamento remoto com dados de pluviômetros (CMAP, TRMM, IMERG, CHIRPS v2.0, TAMSAT v3) e outra parte são provenientes de satélites (PERSIANN-CDR, GPM-DPR, NOAA-GOES, CMORPH-RAW). Esses produtos

apresentam cobertura para todo o território brasileiro, podendo contribuir para a melhoria das simulações e dos cenários criados para o desenvolvimento do Cerrado.

A confiabilidade e o grau de incerteza desses produtos variam bastante. Li et al. (2020) testaram o produto TRMM na bacia do Lago Poyang, na China, localizado no curso inferior do rio Yangtze, e verificaram que esse produto possui boa precisão. Guermazi et al. (2019) avaliaram o produto CHIRPS v2.0 na região noroeste da África, e observaram um bom desempenho do produto na simulação de precipitação em escala mensal. Belete et al. (2020) verificaram que os produtos CHIRPS v2.0 e TAMSAT v3 apresentaram a mesma precisão na estimativa da chuva na região da bacia do rio Nilo Azul. Hamal et al. (2020) testaram o produto MERRA-2 no Nepal e observaram um melhor desempenho do produto no inverno, pós-moção e pré-moção do que nas monções de verão. Basheer et al. (2019) testaram o produto MSWEP na região da bacia do rio Nilo na República do Sudão do Sul e observaram melhor desempenho na simulação de chuvas anuais comparando com os produtos PERSIANN-CDR, CPC M2.3.2 e CHIRPS v2.0.

No contexto da aplicação de produtos de precipitação na modelagem hidrológica do bioma Cerrado, Amorim et al. (2020) utilizaram os dados do TRMM e IMERG na bacia do Tocantins-Araguaia com auxílio do programa SWAT. Ferraz et al. (2023) aplicaram o produto de precipitação TRMM na modelagem hidrológica da bacia do Rio Formoso, localizada no bioma Cerrado, no oeste do estado da Bahia. Por sua vez, Junqueira et al. (2022) realizaram a modelagem hidrológica na bacia do Rio Pandeiros, também no bioma Cerrado, utilizando os produtos de precipitação TMPA e IMERG.

Existem poucos estudos (FERRAZ et al., 2023; JUNQUEIRA et al., 2022; AMORIM et al., 2020) que avaliaram o desempenho dos produtos de precipitação no bioma cerrado, principalmente em relação a possibilidade de serem utilizados em modelos hidrológicos para melhoria da estimativa da disponibilidade hídrica. Nota-se, portanto, que há necessidade de avaliar a qualidade dos dados desses produtos e a possibilidade melhoria do desempenho dos modelos hidrológicos na estimativa da disponibilidade hídrica.

Nesse contexto, foi objetivo deste trabalho avaliar a acurácia de diferentes produtos de precipitação na estimativa da disponibilidade hídrica por meio da modelagem hidrológica.

2.2.2. Materiais e Métodos

2.2.2.1 Área de Estudo

Para avaliar a acurácia de dados de precipitação por satélite foi utilizada como referência a bacia hidrográfica do rio Paracatu (BHRP), que possui área de drenagem de aproximadamente 44.642,3895 km² (Figura 1). Para fins de avaliação da acurácia dos produtos de precipitação, foi utilizado o posto fluviométrico Porto Extrema, identificado pelo código 42690001, localizado a uma latitude de 17,03° Sul, longitude 46,06° Oeste e altitude de 475 metros (Figura 1). Esse posto fluviométrico possui área de drenagem de 29.913,0899 km², representando 67 % da área total da BHRP.

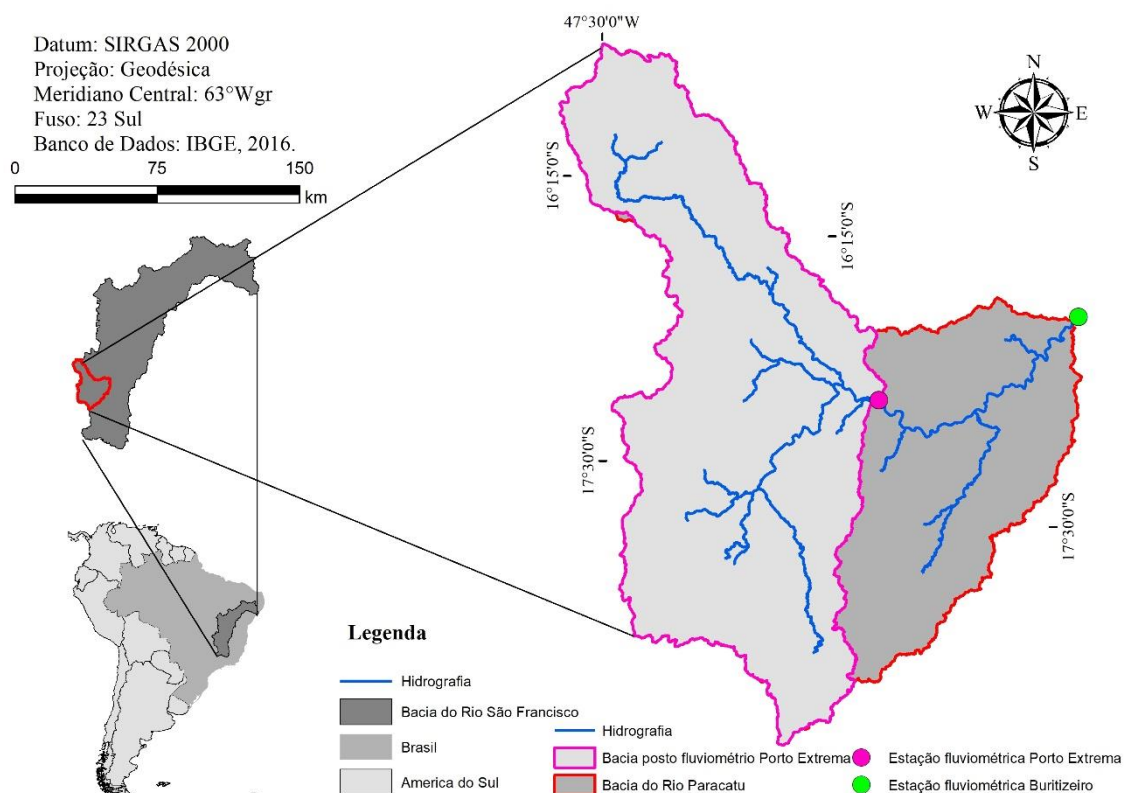


Figura 1. Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu no contexto do Brasil e da bacia hidrográfica do rio São Francisco, com destaque para as estações fluviométricas Porto Extrema.

A região do posto fluviométrico Porto Extrema (PFPE) possui clima tropical úmido. O período chuvoso estende-se de outubro a março, concentrando 93% da precipitação anual. Os meses de novembro, dezembro e janeiro destacam-se como os mais chuvosos dentro desse intervalo.

O período de menor precipitação ocorre entre abril e setembro (HOBBI et al., 2022; BECK et al., 2020). A evapotranspiração média anual é de 1200 mm, com temperatura média anual variando entre 22 e 24 °C (SOUZA et al., 2023; RIBEIRO et al., 2022). A precipitação média anual na região é de 1400 mm (ALTHOFF et al., 2020).

Os solos mais representativos na região são os latossolos vermelho amarelo ocupando cerca de 37% da área e neossolo litológico cerca de 27 % . Os latossolos vermelho amarelo são solos com boa drenagem, altamente intemperizados e profundos, localizados em áreas de relevo plano a suave-ondulado enquanto os neossolos litológico são rasos, bem drenados, ocorrendo em áreas planas ou suave-onduladas (RODRIGUES, 2023).

A BHRP possui altitude média de 701 metros com o relevo predominantemente suave ondulado com cerca de 41,68 % da sua área. No ano de 2018, o uso do solo incluía cerca de 37% de pastagem, 23% formações naturais savânicas, 15% de lavouras, 11% de formação naturais florestais, 14% de outros usos múltiplos o uso da terra (MAPBIOMAS, 2018).

2.2.2.2 Produtos de precipitação

Para a análise de acurácia dos produtos de precipitação, foram utilizados dados do ERA5, PERSIANN-CDR, MSWEP, GPCC 7.0, CHIRPS v2.0 referentes ao período de período 1983 a 2018 (35 anos de dados). Esses conjuntos de dados foram adquiridos do banco de dados do Google Earth Engine (GEE) (<https://code.earthengine.google.com/>) (RINCÓN-AVALOS et al., 2022).

O produto ERA5, foi desenvolvido pela Comissão Européia do Copernicus Climate Change Service (C3S) e implementado pela ECMWF. Essa é a quinta geração de reanálise atmosférica (BAKER et al., 2021; HERBACH et al., 2020). A resolução espacial é de 0,25° x 0,25° (ou aproximadamente 27,8 km). A série histórica de dados vai de 1979 até o presente (HERBACH et al. 2019).

O produto PERSIANN-CDR foi desenvolvido pelo *Center for Hydrometeorology and Remote Sensing* (CHRS) e pela Universidade da Califórnia em Irvine (UCI) (RINCÓN-AVALOS et al., 2022; MENGISTU et al., 2022). A resolução espacial é de 0,25° (aproximadamente 27,8 km) com cobertura geográfica na faixa da latitude de 60° S e 60°N. A série histórica de dados vai de 1983 até o presente (MOGES et al., 2022).

O produto MSWEP foi desenvolvido pela *University of California, Los Angeles* (UCLA) com colaboração do *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) (AWANGE

et al., 2019). A resolução espacial é de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$, (ou aproximadamente 11 km). A série histórica de dados vai de 1979 até o presente (BECK et al., 2017; BECK et al., 2018).

O GPCC 7.0 foi desenvolvido pelo *Global Precipitation Climatology Center* (GPCC), que é operado pela *Deutscher Wetterdienst* (DWD, Serviço Meteorológico Nacional da Alemanha) (BASHEER; ELAGIB, 2019). A resolução espacial é de $1,0^\circ \times 1,0^\circ$ (ou aproximadamente 111,11 km), a série histórica de dados vai de 1981 até o presente (SCHNEIDER et al., 2016).

O produto CHIRPS v2.0, é um conjunto de dados de precipitação desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e pelo Grupo de Riscos Climáticos da Universidade da Califórnia, Santa Barbara (UCSB) (DATOK et al., 2022). Esse produto possui resolução espacial de $0,008^\circ \times 0,008^\circ$, (ou aproximadamente 0,89 km), com cobertura geográfica quase global (50°S a 50°N), a série histórica de dados vai de 1981 até o presente (BELETE et al., 2020 ; MENGISTU et al., 2022).

Esse conjunto de dados (Tabela 1) foi escolhido por fornecer uma série de dados diários a partir de 1 de janeiro de 1981 até o presente momento, além possuir diferentes resoluções espaciais.

Tabela 1. Produtos de precipitação.

ID	Produto de Precipitação	Resolução	Período	Fonte
1	ERA5	25 km	1983 a 2018	https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form
2	PERSIANN-CDR	27 km	1983 a 2018	https://chrsdata.eng.uci.edu/
3	MSWEP	11 km	1983 a 2018	https://www.gloh2o.org/MSWEP/
4	GPCC 7.0	111 km	1983 a 2018	https://opendata.dwd.de/climate_environment/GPCC/html/download_gate.html
5	CHIRPS v2.0	5,6 km	1983 a 2018	https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/africa_daily/tifs/p05/

2.2.2.3. Simulação da disponibilidade hídrica

Para simular a disponibilidade hídrica da BHRP, foi utilizado o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (ARNOLD et al., 1998). O SWAT é um modelo hidrológico semi-conceitual, distribuído, estocástico e contínuo no tempo, que opera em um intervalo de tempo diário (MARARAKANYE et al., 2020).

A base de dados necessária para simulação hidrológica com o modelo SWAT é constituída por dados tabulares e espaciais. As informações espaciais são constituídas pelos mapas de tipo de solos, modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado e de uso e cobertura do solo. Os dados tabulares constituem o banco de dados com informações quantitativas sobre clima, vegetação, solos, aquíferos, vazão, manejo, etc.

Para seleção das estações pluviométricas utilizadas na simulação, utilizou-se como critério as estações localizadas a uma distância menor do que 5 km do divisor de águas da bacia. Após uma análise na base de dados da ANA (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>), foram identificadas 23 estações pluviométrica que satisfizeram a este critério. Após análise de consistência dos dados, que consistiu em eliminar as estações com mais de 10% de falhas, foram selecionadas quatro estações com série histórica de precipitação variando de 1988 a 2018, Tabela 2.

Para vazão observada, foram utilizados os dados do posto fluviométrico de Porto Extrema código 42690001, latitude 17.03° sul, longitude 46,06 oeste e altitude de 475 metros (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>). Foi realizado um pré-tratamento dos dados, descartando, na determinação de séries de totais anuais, os anos que apresentaram falhas superiores a 10%, no intuito de evitar a obtenção de dados anuais não representativas (AMORIM et al., 2020; JUNQUEIRA et al., 2020).

Na Figura 2 apresenta-se mapas da área de drenagem do PFPE, com destaque para as estações pluviométricas, fluviométricas e climatológicas, figura (a), pedologia, figura (b), relevo, figura (c) e uso do solo, figura (d).

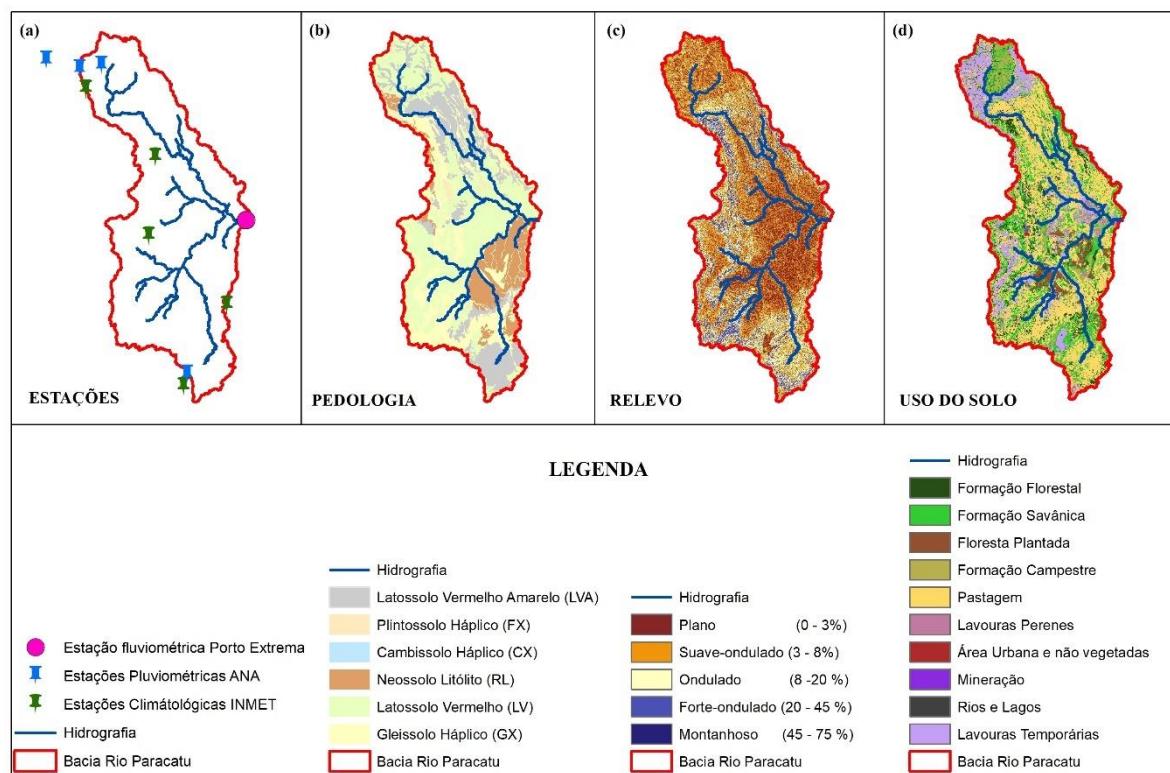


Figura 2. Mapa da área de drenagem do PFPE, com destaque para as estações pluviométricas, fluviométricas e climatológicas, Figura (a), pedologia, Figura (b), relevo, Figura (c) e uso do solo, Figura (d).

Tabela 2. Estações pluviométricas e climatológicas.

Estação Pluviométrica*	Nome	Latitude	Longitude	Altitude
1547005	Brasília (Núcleo Bandeirante)	-15,78	-47,93	620
1547021	Barreiro DR-130	-15,84	-47,63	994
1547022	Rio Preto	-15,79	-47,43	928
1846005	Presidente Olegário	-18,41	-46,42	941
Estação Climatológica**	Nome	Latitude	Longitude	Altitude
A571	Paracatu	-17,24	-46,88	705
A047	Paranoá (COOPA-DF)	-16,01	-47,56	1043
A542	Unaí	-16,55	-46,88	641
A047	Paranoá (COOPA-DF)	-16,01	-47,56	1043
A553	João Pinheiro	-17,78	-46,12	877
A562	Patos de Minas	-18,52	-46,44	950

*(<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>)

**(<https://bdmep.inmet.gov.br/#>)

A evapotranspiração de referência foi estimada pelo método de Penman- Monteith (MONTEITH, 1965). Para isto foi utilizado dados diários de temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar, referente a sete estações climatológicas, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Figura 2a, para o período de 1988 a 2018 (30 anos de dados) (<https://bdmep.inmet.gov.br/#>).

O Modelo Hidrológicamente Condicionado (MDEHC) foi elaborado a partir dos dados NASADEM (<https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=nasadem>) (NASA JPL, 2020). O mapa de solos foi obtido através do GEOINFO (Infraestrutura de Dados Espaciais da Embrapa), no formato vetorial de *shapefile*, com escala exploratória de 1: 5.000 (https://geoinfo.cnpm.embrapa.br/layers/geonode%3Acerrados_bd1_v5b) (EMBRAPA, 2020).

O mapa de uso e ocupação do solo, do ano de 2018, com resolução de 30 metros, no formato *geotiff*, foi adquirido do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomias) (https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/brasil/collection-7/lclu/coverage/brasil_coverage_2018.tif) (SOUZA et al., 2020) (Figura 2d).

Os parâmetros físicos-hídricos utilizados para cada tipo de solo no modelo SWAT foram baseados nos trabalhos de Almeida, (2019); Pereira et al., (2016); Gomes et al., (2020). Esses parâmetros são: número de camadas do solo (N_LAYER), grupo hidrológico (HYDCRP), profundidade máxima do solo (SOL_ZMX), profundidade da camada do solo (SOL_Z), densidade do solo (SOL_BD), armazenamento de água no solo (SOL_AWC), condutividade hidráulica do solo (SOL_K), teor de carbono orgânico do solo (SOL_CBN), argila do solo (CLAY), silte (SILT), areia (SAND), conteúdo de rocha (ROCK) e fator de erodibilidade do solo (USLE_K).

O modelo foi calibrado e validado para a estação fluviométrica de Porto Extrema (código 42690001). Os primeiros cinco anos da série de dados (1983-1987) foram utilizados para o aquecimento do modelo. O período de aquecimento do modelo é utilizado para que, ao iniciar a simulação, as variáveis de estado do modelo estejam livres das influências das condições iniciais.

A calibração foi executada no período de janeiro de 1988 a dezembro de 2008 (período de 20 anos) com intervalo de tempo mensal que representa 67% das amostras das vazões observadas. Na validação, foi utilizado o período de dados de 2009 a dezembro de 2018 (período de 10 anos) que representa 33% das amostras das vazões observadas.

2.2.2.4 Avaliação da acurácia dos produtos de precipitação

Para avaliar os produtos de precipitação foi utilizada a análise ponto a pixel (KOURTIS et al., 2022). Nesta análise, os dados de precipitação dos produtos de precipitação são extraídos dos pixels e comparados com os dados obtidos da estação pluviométrica. De posse dos dados, foi realizada a análise de correlação, entre as duas variáveis e realizado testes de acurácia.

Além disso, foram utilizadas as seguintes estatísticas: percentual de viés (PBIAS, Eq. 1), erro médio absoluto (MAE, Eq. 2) (ABRO et al., 2020), raiz do erro quadrático médio (RMSE, Eq.3), coeficiente de determinação (R^2 , Eq.4), índice de eficiência de Nash – Sutcliffe Efficiency (NSE, Eq.5)(NASH; SUTCLIFFE, 1970) e índice de eficiência de Kling-Gupta (KGE, Eq. 6) (GUPTA et al., 2009).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi} - Q_{simi})}{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi})} \right] \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Sim_i - Obs_i| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (Sim_i - Obs_i)^2} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Obs_i - \overline{Obs_i}) (Sim_i - \overline{Sim_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Obs_i - \overline{Obs_i})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Sim_i - \overline{Sim_i})^2}} \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi} - Q_{simi})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi} - Q_{meani})^2} \quad (5)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (6)$$

sendo

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Obs_i - \bar{Obs}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Obs_i - \bar{Obs}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Sim_i - \bar{Sim}_i)^2}}$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o}$$

$$\gamma = \frac{CV_s}{CV_o} = \frac{\sigma_s/\mu_s}{\sigma_o/\mu_o}$$

em que

Q_{obs} = valor observado para o i-ésimo ponto;

Q_{sim} = valor simulado para o i-ésimo ponto;

N = número total de pontos;

Sim_i = valor simulado para o i-ésimo ponto;

Obs_i = valor observado para o i-ésimo ponto;

n = número de observações;

Na tabela 3 apresenta-se valores dos limiares estatísticos que foram considerados como diretriz de interpretação do desempenho dos dados de precipitação por satélite (MARARAKANYE et al., 2020).

Tabela 3. Valores de limiar estatísticos para interpretação do desempenho do modelo.

Avaliações de desempenho	R^2	NSE	PBIAS
Muito bom	> 0,7 - 1	> 0,75 - 1	<± 10
Bom	> 0,6 - 0,7	> 0,65 - 0,75	± 10 ± 15
Satisfatório	> 0,5 - 0,6	> 0,50 - 0,65	± 15 ± 25
Insatisfatório	≤ 0,5	≤ 0,50	≥ ± 25

(MARARAKANYE et al., 2020 and N. MORIASI et al., 2007)

2.2.3. Resultados e Discussão

2.2.3.1 Avaliação da acurácia dos produtos de precipitação

Na Figura 3 apresenta-se, na forma de boxplot, a distribuição da precipitação anual total estimada pelos produtos de precipitação para a bacia hidrográfica do rio Paracatu. Analisando a Figura 3, nota-se que os dados de precipitação anual obtido dos diversos produtos foram semelhantes, com exceção do produto PERSIANN-CDR que apresentou maior variabilidade.

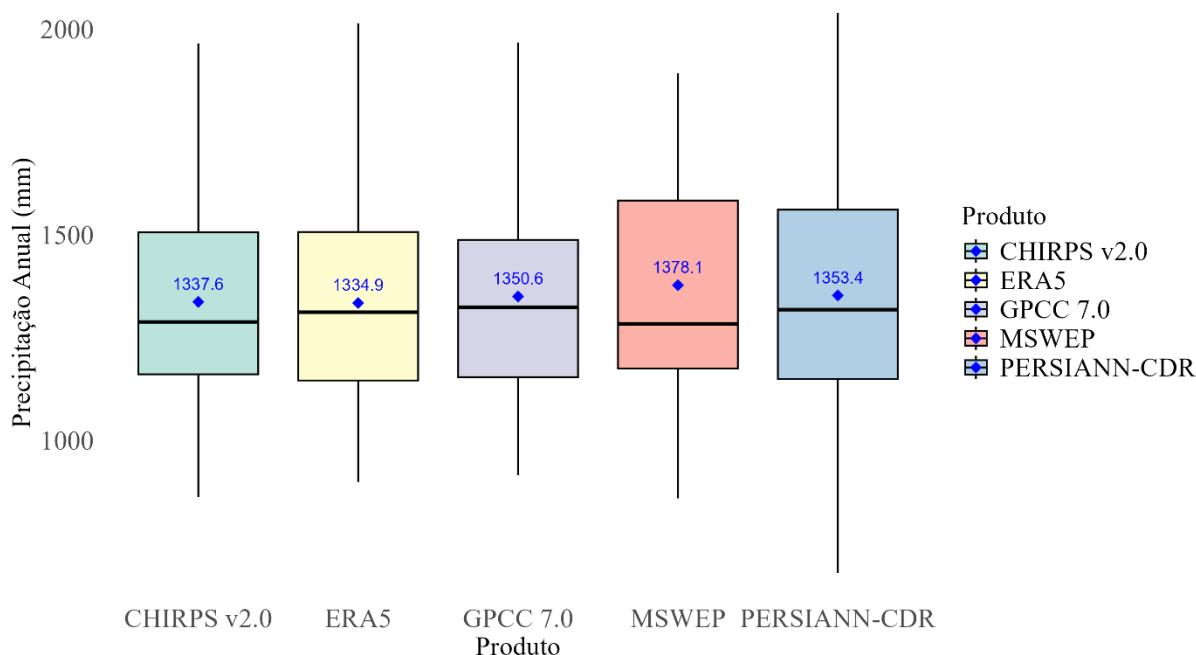


Figura 3. Gráfico boxplot da precipitação anual total simulada dos produtos de precipitação do PFPE.

Analisando a Figura 3, os produtos CHIRPS v2.0 e ERA5 apresentaram resultados bastante próximos em relação à precipitação anual média, com valores de 1.337,6 mm e 1.334,9 mm, respectivamente uma diferença de 2,7 mm. Ambos exibiram amplitude moderada, com limites inferiores de 862,8 mm (CHIRPS) e 899,7 mm (ERA5), uma diferença de 4,28%, enquanto atingiu limites superiores de 1.966,2 mm e 2.014,9 mm, respectivamente uma diferença de 18,7mm.

O produto MSWEP apresentou uma precipitação anual média de 1.378,1 mm, com valor mínimo de 859,9 mm e um valor máximo de 1.893,3 mm, mais baixo em comparação com outros produtos.

O GPCC 7.0 apresentou uma precipitação anual média de 1.350,6 mm, cerca de 0,21% menor que o PERSIANN-CDR. O produto GPCC 7.0 se destacou com o maior limite inferior de 916,8 mm quando comparado ao PERSIANN-CDR, MSWEP, ERA5, CHIRPS v.2.0. O limite superior do GPCC 7.0 foi de 1.967,8 mm, com uma diferença de 0,08% para o produto CHIRPS v2.0. Por outro lado, o produto PERSIANN-CDR apresentou a maior amplitude de valores entre os produtos analisados, com uma precipitação anual média de 1.353,4 mm, mas com valor mínimo de 578,4 mm e máximo de 2.040,3 mm.

Essa maior amplitude pode indicar uma maior sensibilidade do PERSIANN-CDR a eventos extremos, ou falha ao detectar condições regionais ou temporais, também pode ser atribuída às limitações inerentes ao algoritmo do PERSIANN-CDR, que utiliza dados de satélite e redes neurais artificiais para estimar a precipitação, podendo resultar em estimativas menos precisas em regiões com características climáticas complexa (TAN et al., 2021)

2.2.3.2 Análise de correlação das estações pluviométricas e os produtos de precipitação

Na Figura 4 é apresentado o gráfico de correlação de Pearson (r) comparando a precipitação anual total observada (estação pluviométrica) com os dados obtidos dos produtos de precipitação. Os números 1747005, 1547022, 1547021 e 1846005 referem-se às identificações dessas estações pluviométricas com dados observados. As demais informações representadas no gráfico correspondem a valores estimados pelos satélites em pixels coincidentes com as localizações das estações pluviométricas.

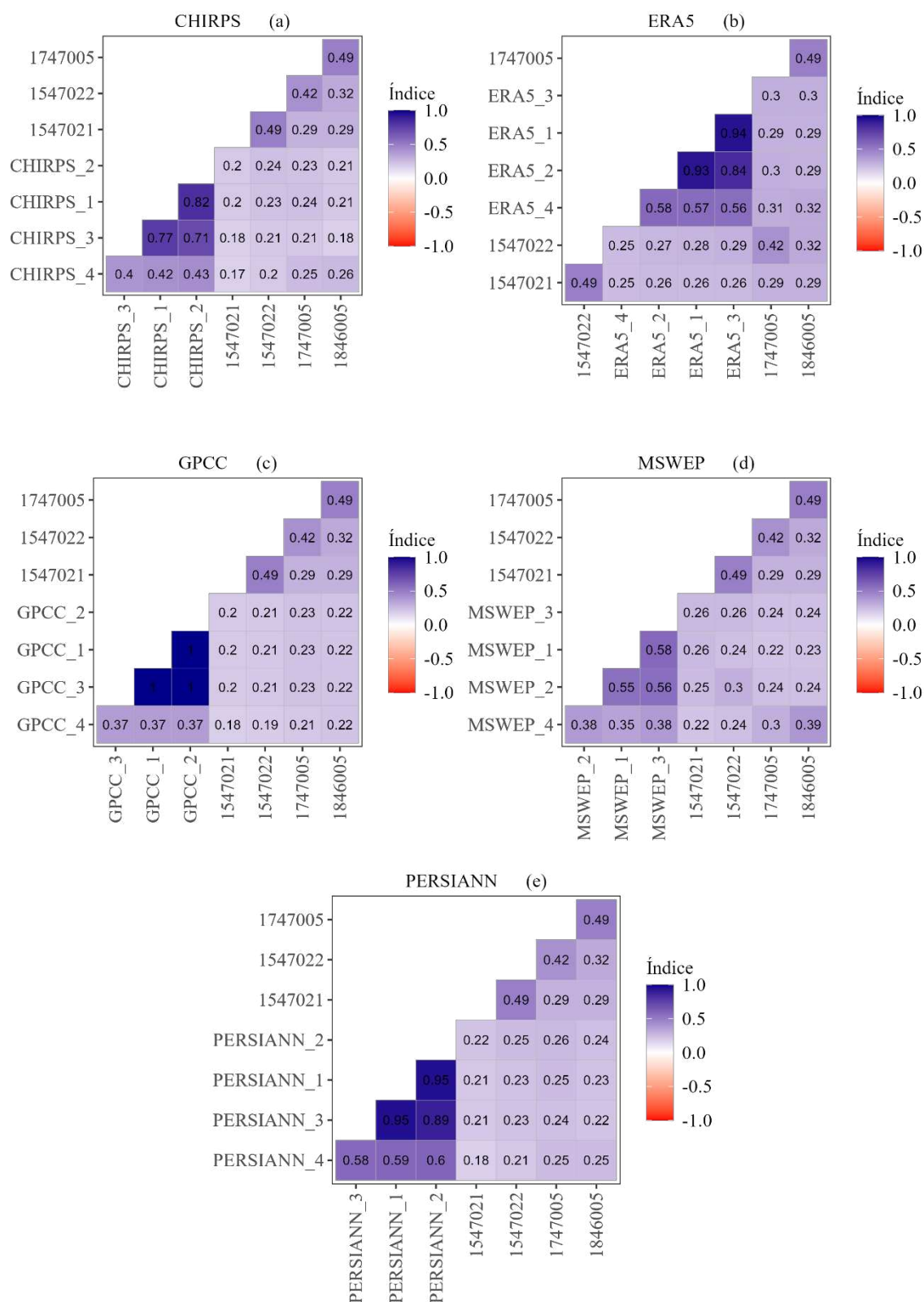


Figura 4. Gráfico da correlação de Pearson da precipitação simulada dos produtos de precipitação da bacia do rio Paracatu.

Avaliando o produto CHIRPS v2.0 (CHIRPS_1, CHIRPS_2, CHIRPS_3 e CHIRPS_4) em relação às estações pluviométricas 1547021, 1547022, 1747005 e 1846005, foram encontrados valores de coeficiente de correlação que variam de 0,17 a 0,26, indicando uma correlação muito fraca ou inexistente entre o pixel do produto de precipitação e os dados observados.

No caso do produto ERA5 (ERA5_1, ERA5_2, ERA5_3 e ERA5_4) avaliados com as mesmas estações pluviométricas apresentaram valores do coeficiente de correlação que variam de 0,25 a 0,32, indicando uma correlação fraca. Em comparação com o CHIRPS, o ERA5 apresentou uma diferença percentual de desempenho entre 15% e 47% superior, mostrando uma leve melhora na representação dos dados de precipitação.

A análise do produto GPCC 7.0 (GPCC_1, GPCC_2, GPCC_3 e GPCC_4) para as mesmas estações pluviométricas revelou valores do coeficiente de correlação que variam de 0,18 a 0,23, também representando uma correlação muito fraca entre os valores estimados e os observados, valores próximos ao CHIRPS diferença que varia de 6 % a 13%.

Para o produto MSWEP, os valores obtidos (MSWEP_1, MSWEP_2, MSWEP_3 e MSWEP_4) variaram de 0,22 a 0,39, indicando uma correlação que vai de fraca a moderadamente fraca. O destaque foi para MSWEP_4, que sozinho atingiu o valor de 0,39, o maior valor entre os produtos avaliados. Por fim, o produto PERSIANN-CDR (PERSIANN_1, PERSIANN_2, PERSIANN_3 e PERSIANN_4), analisados em relação às mesmas estações pluviométricas, apresentaram valores de 0,18 a 0,26, indicando uma correlação fraca, valores próximos ao do produto CHIRPS.

2.2.3.3 Avaliação do desempenho dos produtos de precipitação na estimativa da disponibilidade hídrica

Na Figura 5 são apresentados cinco gráficos de dispersão da vazão mensal simulada para os cinco produtos de precipitação.

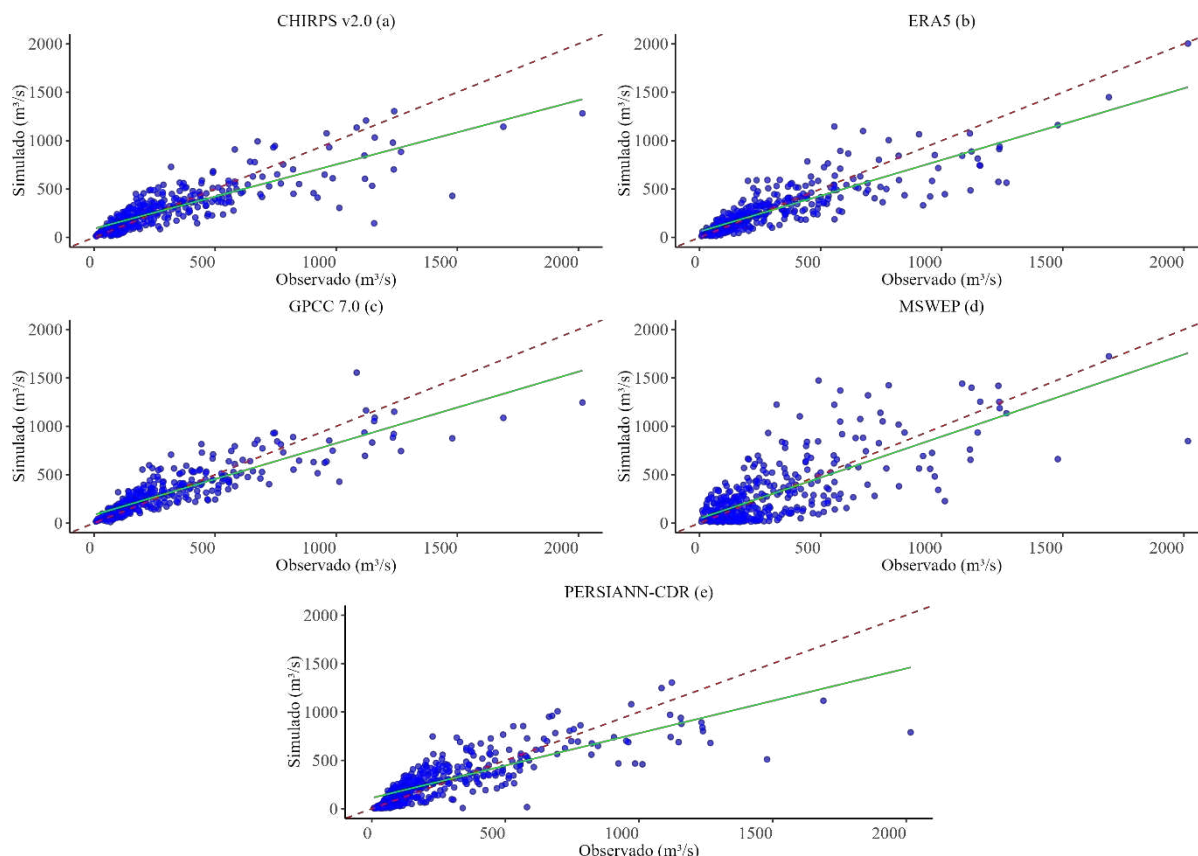


Figura 5. Comparação entre a disponibilidade hídrica mensal, no posto fluviométrico Porto Extrema, simulada pelo modelo SWAT, obtida com os cinco produtos de precipitação e com os dados de precipitação observados. A reta tracejada representa a relação 1:1 e sólida representa a reta de regressão.

A figura 5(a) apresenta o produto CHIRPS v2.0, que possui uma resolução espacial de 5,6 km e uma correlação moderada com $R^2=0,69$. Embora CHIRPS v2.0 seja capaz de captar bem a tendência dos dados observados, há uma dispersão em torno da linha de ajuste. Essa resolução pode permitir uma melhor representação de variações espaciais finas, mas a dispersão observada indica que, apesar disso, o produto pode não capturar adequadamente eventos extremos, que é confirmado no trabalho de Du et al. (2024). Esses resultados sugerem que, embora o CHIRPS v2.0 tenha uma boa capacidade de representar precipitações na bacia do rio Paracatu, sua performance pode ser limitada em relação à captura precisa de eventos extremos ou variabilidade espacial muito específica.

O estudo de Pang et al. (2020), realizado no rio Jialing, localizado no planalto oriental do Tibete, verificou que o produto CHIRPS v2.0 subestima chuvas intensas (precipitações máximas). Shahid et al. (2021) realizaram um estudo na bacia do rio Indo na região do Hindu

Kush Himalaia, e observaram que o produto CHIRPS v2.0 também superestima chuvas intensas.

O gráfico (b) mostra que o produto de precipitação ERA5, com resolução de 25 km, atingiu um coeficiente R^2 de 0,74, indicando o segundo melhor ajuste, ficando atrás apenas do produto GPCC v2.0. Apesar de ter uma resolução mais grosseira do que o CHIRPS v2.0, ERA5 apresenta menor dispersão dos dados quando comparado aos produtos CHIRPS v2.0, MSWEP e PERSIANN-CDR. Este desempenho sugere que o ERA5, mesmo com resolução mais baixa, pode ser uma das fontes mais acuradas de dados de precipitação para estudos hidrológicos na região, devido a métodos de assimilação de dados que melhoram a qualidade das estimativas conforme é avaliado nos trabalhos de Jahanshahi et al. (2024) e Jiang et al., (2021). O ERA5 apresentou uma subestimação de 15 % dos dados observados.

Este produto de precipitação é formado por um conjunto de dados de estações pluviométricas, dados de satélite e dados de reanálise. Pereira et al. (2024) comenta o produto ERA5 possui bom desempenho em representar as chuvas na região da bacia do rio Tocantins-Araguaia no bioma cerrado, podendo apresentar resultados satisfatórios para modelagem hidrológica.

O gráfico (c) apresenta o maior coeficiente de determinação (R^2), com valor de 0,77, para o produto GPCC 7.0, que tem a resolução mais grosseira de 111 km. Essa forte correlação entre os valores simulados e observados, apesar da baixa resolução, o GPCC 7.0 utiliza métodos robustos de processamento e ajuste de dados baseados em dados terrestres observado que compensam a perda de detalhamento espacial, resultando em uma linha de tendência bem ajustada e com menos dispersão (BASHEER; ELAGIB, 2019). Este resultado indica que o GPCC 7.0 possui a melhor acurácia entre os produtos avaliados para representar as precipitações na bacia do rio Paracatu, demonstrando que, em algumas situações, produtos de menor resolução podem oferecer estimativas mais estáveis e confiáveis, especialmente para áreas extensas.

A melhor acurácia do GPCC 7.0 é justificada pelos trabalhos de Schirmeister et al. (2024) ; Schneider et al., (2014), que descrevem que este produto de precipitação possui uma densidade elevada de pluviômetros com cerca de 126.000, cerca de três quartos delas com longas séries temporais. Esses dados são coletados globalmente a partir de redes de monitoramento operadas por serviços meteorológicos e hidrológicos nacionais e outras instituições. Além disso, os pesquisadores Schirmeister et al. (2024) ; Schneider et al., (2014), comentam que o GPCC 7.0 possui um rigoroso controle de qualidade para conferencia dos

dados, e na América do Sul, este produto possui distorções na medição somente na região Amazônica.

O gráfico (d) representa o produto MSWEP, que possui a resolução de 11 km, mas apresentou o menor coeficiente de determinação (R^2) 0,52. Este é o menor valor de correlação entre os dados simulados e observados, indicando que, apesar da alta resolução, o MSWEP não consegue representar adequadamente as precipitações na bacia. A significativa dispersão dos dados sugere que o produto pode ter dificuldades em captar eventos de precipitação extremos ou características específicas da região, o que limita sua adequação para modelagem hidrológica nesta área.

Celante (2020), utilizou o MSWEP na modelagem hidrológica com o modelo SWAT na bacia do rio Guaporé, localizada no estado Rio Grande do Sul, e obteve o valor de 0,60 para o coeficiente de determinação (R^2), cerca de 8% do valor encontrado neste estudo que foi de 0,52. No entanto, em ambos os casos o produto de precipitação MSWEP apresenta limitações na captura da variabilidade local e de eventos extremos de precipitação. Essas limitações são atribuídas à dificuldade do produto em representar adequadamente chuvas convectivas intensas e características específicas da região.

A figura (e) representa o gráfico de dispersão do produto PERSIANN-CDR, que obteve um coeficiente de determinação (R^2) com valor de 0,65, o segundo pior entre os analisados. Com uma resolução de 27 km, similar ao ERA5, o PERSIANN-CDR apresenta uma dispersão moderada, com dados ao redor da linha de tendência indicando uma superestimação de 15% dos dados.

Frade (2019), utilizou o PERSIANN-CDR e MSWEP na modelagem hidrológica com o modelo SWAT na bacia do rio Piancó, localizada no estado da Paraíba, e obteve o valor de 0,25 para o coeficiente de determinação (R^2), cerca de 40% menor que o valor encontrado neste estudo.

Essa redução dos valores dos coeficientes de determinação (R^2) pode ser explicada pela mudança na disponibilidade hídrica. Nos primeiros 20 anos do período de 1988 a 2008, usado para calibração, a vazão média foi de 325,45 m³/s. Já nos últimos 10 anos, de 2009 a 2019, usados para validação, a vazão média foi de 221,12 m³/s, houve uma redução de 104,33 m³/s. Essa diminuição significativa na vazão média faz com que o modelo SWAT tenda a simular vazões menores, mais abaixo das vazões observadas, podendo interferir no valor do coeficiente de determinação (R^2).

Após a calibração e validação do modelo hidrológico SWAT com os dados observados das estações pluviométricas, realizou-se a substituição dos dados observados de precipitação

pelos dados estimados pelos produtos de precipitação. Essa substituição visou avaliar o impacto dos produtos na simulação hidrológica.

Em seguida, foram exportadas planilhas no formato *.csv* contendo os resultados das vazões dos produtos de precipitação para sempre importadas no software *r studio* para realização os cálculos das métricas estatísticas, utilizadas para verificar o desempenho de cada produto de precipitação em relação aos dados observados.

Tabela 4. Métricas para avaliar a vazão mensal simulada dos cinco produtos de precipitação usados na bacia hidrográfica do rio Paracatu.

Produtos de precipitação	Calibração					
	RMSE	MAE	R ²	PBIAS	KGE	NSE
CHIRPS	172,6429	108,9671	0,7033	-4,4000	0,7081	0,6952
ERA 5	163,9911	101,2705	0,7303	-7,0000	0,7873	0,7250
GPCC	154,6727	101,7429	0,7590	3,2000	0,7766	0,7553
MSWEP	251,5850	177,7780	0,5283	-2,5000	0,6897	0,3527
PERSIAN	194,3152	132,0524	0,6254	9,9000	0,6677	0,6138
Produtos de precipitação	Validação					
	RMSE	MAE	R ²	PBIAS	KGE	NSE
CHIRPS	129,1947	74,9540	0,6408	3,1000	0,7914	0,6180
ERA 5	104,6092	71,5094	0,7496	0,1000	0,8118	0,7496
GPCC	92,3337	65,2548	0,8055	2,4000	0,8540	0,8049
MSWEP	203,6664	140,5826	0,4908	11,3000	0,5234	0,0507
PERSIAN	112,3257	79,3744	0,7357	-9,4000	0,8280	0,7113

Nas Figuras 6 e 7, são apresentados os fluviogramas de vazão mensal simulada para os cinco produtos de precipitação.

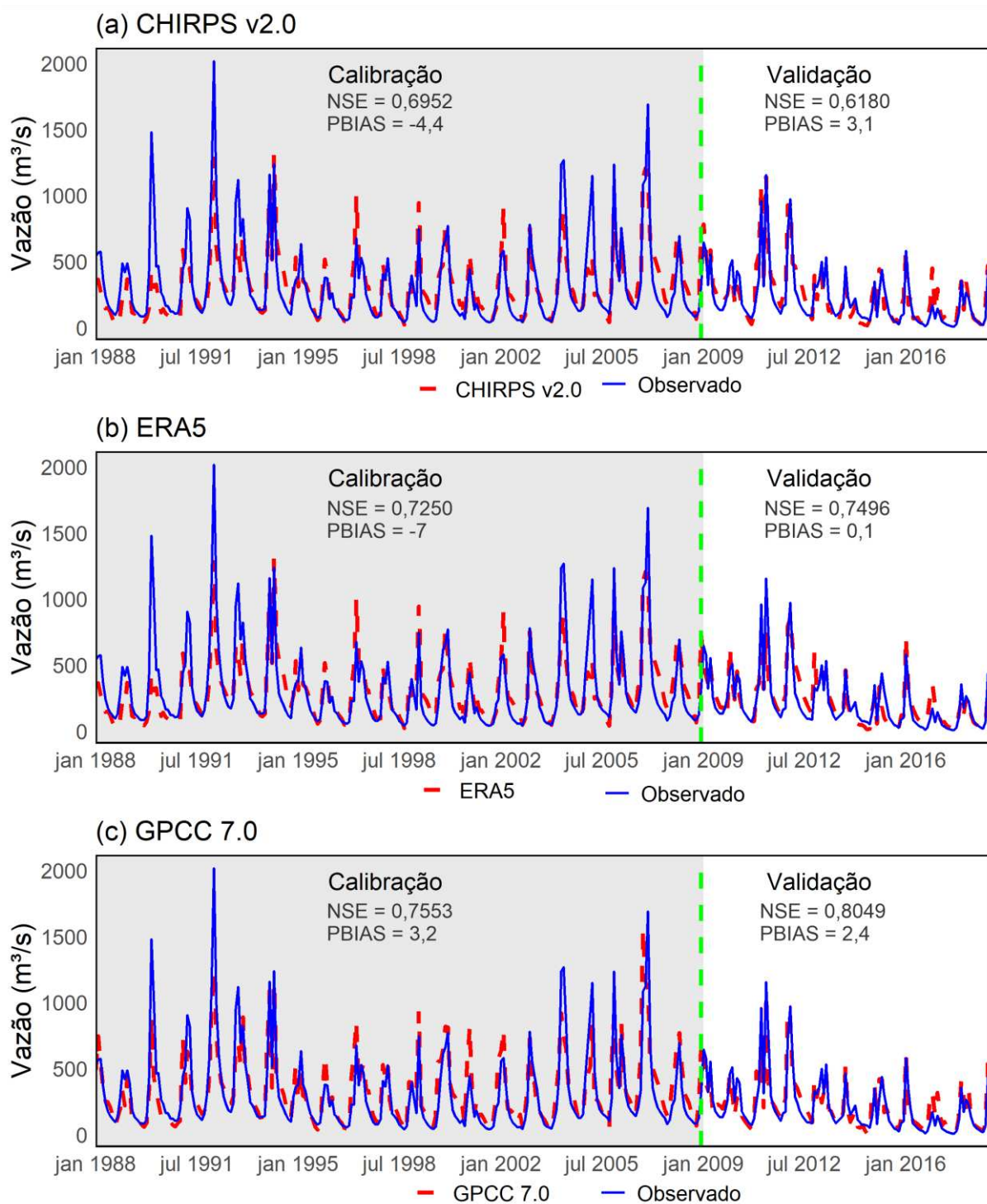


Figura 6 – Vazões observada e simulada para os produtos de precipitação (a) CHIRPS v.2.0, (b) ERA 5, GPCC 7.0 (c) para os anos de 1988 a 2018.

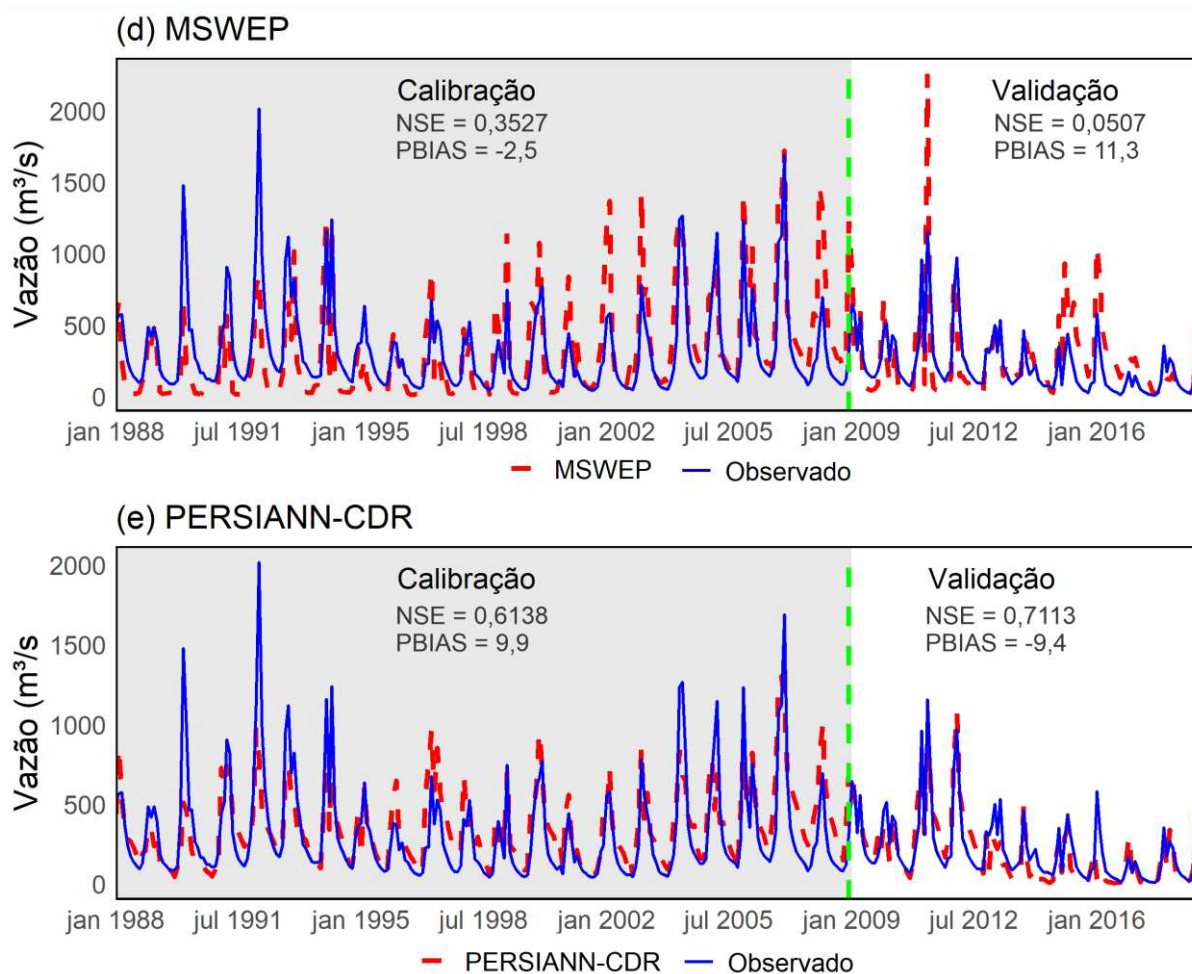


Figura 7 – Vazões observada e simulada para os produtos de precipitação MSWEP (d) e PERSIANN-CDR (e) para os anos de 1988 a 2018.

Analisando as Figuras 4 e 5, observa-se que o produto PERSIAN-CDR (Figura 7b) foi classificado como satisfatório na etapa de calibração com o valor do índice de eficiência de Nash – Sutcliffe Efficiency (NSE) de 0,6138, segundo os critérios de avaliação de desempenho de Mararakanye et al. (2020) e Moriase (2007), o CHIRPS v.2.0 (Figura 6a) e o ERA5 (Figura 6b) foram classificados como bons, com NSE iguais a 0,6952 e 0,7250 respectivamente, e o GPCC 7.0 (Figura 6c) com NSE de 0,7553 como muito bom. O MSWEP (Figura 7a), por outro lado, foi considerado insatisfatório, com um valor de NSE de 0,3527.

Durante o período de validação, os modelos, exceto o CHIRPS v.2.0, demonstraram um desempenho superior em comparação à etapa de calibração. O GPCC 7.0 foi classificado como muito bom, com um valor de NSE de 0,8049. O CHIRPS v.2.0, ERA5 e PERSIAN-CDR (Figura 7b) foram classificados como bons, apresentando valores de NSE de 0,6180, 0,7496 e 0,7113, respectivamente. O MSWEP, no entanto, atingiu um valor de NSE de 0,0507, sendo classificado como insatisfatório.

Os valores do viés percentual (PBIAS) foram utilizados para avaliar o desempenho do modelo na simulação das vazões durante a calibração e validação. Na etapa de calibração, todos os produtos de precipitação foram classificados como muito bons, de acordo com Mararakanye et al. (2020). O CHIRPS v.2.0, ERA5 e MSWEP apresentaram valores de PBIAS de -4,4, -7,0 e -2,5, respectivamente, indicando que esses produtos de precipitação subestimaram a vazão, ou seja, a média das vazões simuladas foi menor que a média das vazões observadas. Por outro lado, o GPCC 7.0 e o PERSIAN-CDR superestimaram as vazões atingindo valores de PBIAS de 3,2 e 9,9, respectivamente.

Na validação, somente o MSWEP foi classificado como bom pois atingiu valor de PBIAS DE 11,3, enquanto CHIRPS v.2.0, ERA 5, GPCC 7.0 e PERSIAN-CDR foram classificados como muito bom pois atingiram valores de 3,1, 0,1, 2,4 e -9,4 respectivamente. Porém só PERSIAN-CDR subestimou a vazão modelada enquanto o restante superestimou as vazões simuladas, conforme pode ser visto na figura 7.

Ao analisar o coeficiente estatístico do erro médio absoluto (MAE), observou-se que, na calibração, todos os produtos apresentaram valores superiores a 100. Especificamente, os valores de MAE foram: CHIRPS v.2.0 (108,9671), ERA5 (110,2705), GPCC 7.0 (101,7429), MSWEP (177,7780) e PERSIAN (132,0524). Os valores altos de MAE indicam que os produtos de precipitação exibiram uma precisão limitada, com erros significativos nas estimativas das vazões simuladas em comparação às vazões observadas.

Na validação, apenas o produto MSWEP alcançou um valor de 140,5829, enquanto os demais produtos registraram valores abaixo de 100: CHIRPS v.2.0 (74,9540), ERA5 (71,5094), GPCC 7.0(65,2548) e PERSIAN (79,3744). Esses resultados indicam uma precisão relativamente boa dos modelos hidrológicos na validação, com erros absolutos médios menores entre as vazões simuladas e observadas, refletindo uma concordância satisfatória entre os dados previstos e observados.

Analisando a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), observou-se que, após a calibração, os valores reduziram significativamente de uma média de 520 para 188, conforme mostrado na Tabela 5. Essa redução média de 332 no RMSE indica que a calibração foi bem-sucedida, pois valores menores de RMSE refletem estimativas de vazões simuladas mais precisas. O único produto que apresentou valor acima de 200 foi o MSWEP, com 251,5850, indicando um menor desempenho após a calibração em comparação com os outros produtos. Os produtos CHIRPS v.2.0, ERA5, GPCC 7.0 e PERSIAN-CDR apresentaram valores de 172,6429, 163,991, 154,6727 e 194,3152, respectivamente, com desempenho acima do MSWEP.

Na validação do RMSE, os produtos reduziram em média 355, indicando que a validação foi bem-sucedida. Novamente, o MSWEP obteve um valor acima de 200, registrando 203,6664, enquanto CHIRPS v.2.0, ERA5, GPCC 7.0 e PERSIAN-CDR apresentaram valores de 129,1947, 104,6092, 92,337 e 112,3257, respectivamente. Isso indica que a validação resultou em estimativas de vazões simuladas mais precisas em comparação com a calibração.

Analisando o índice de eficiência Kling-Gupta (KGE) na calibração, observou-se uma melhora nos valores, indicando sucesso na calibração. Os produtos com melhor desempenho foram CHIRPS, ERA5 e GPCC, com valores de KGE de 0,7081, 0,7873 e 0,7766, respectivamente. Em contraste, MSWEP e PERSIAN apresentaram os desempenhos mais baixos, com valores de KGE de 0,6897 e 0,6677, respectivamente.

Na validação, os produtos com melhor desempenho foram CHIRPS v.2.0, ERA5, GPCC 7.0 e PERSIAN-CDR, com valores de KGE de 0,7914, 0,8118, 0,8540 e 0,8280, respectivamente. O produto MSWEP apresentou o menor desempenho, com um valor de KGE de 0,5234.

Entre os cinco produtos de precipitação analisados, o GPCC 7.0 apresentou maior acurácia para estimar a disponibilidade hídrica na PFPE, destacando-se pela robustez em captar tendências hidrológicas, baixa dispersão e alta correlação com dados observados sendo uma escolha ideal para estudos de gestão e planejamento de recursos hídricos na região. Ao comparar essas métricas com os dados observados, observa-se a boa precisão do GPCC 7.0. Durante a calibração, o GPCC 7.0 superou os dados observados, com NSE de 0,7553 enquanto os dados observados atingiram o valor de 0,6874. Na validação, embora o GPCC 7.0 não tenha superado os dados observados, obteve um NSE de 0,8049, enquanto os dados observados alcançaram 0,8206.

Portanto, com base nas métricas de desempenho analisadas, o GPCC 7.0 é o produto de precipitação que apresenta a melhor acurácia para estimar a disponibilidade hídrica na bacia do rio Paracatu na estação fluviométrica de Porto Extrema. Sua robustez em captar tendências hidrológicas, aliada à baixa dispersão e alta correlação com dados observados, faz com que o GPCC 7.0 se destaque como a escolha ideal para estudos de gestão e planejamento de recursos hídricos na região.

Estudos de Hajihosseini et al., (2016) e Gunathilake et al., (2021) corroboram esses resultados, confirmando a eficácia do GPCC 7.0 como produto de precipitação de entrada no modelo SWAT.

No Brasil, atualmente não existem trabalhos que utilizam os dados do GPCC 7.0 para modelagem hidrológica no SWAT. Isso se deve à resolução espacial de 111 km, que limita a

representação da distribuição espacial das chuvas em pequenas bacias. Áreas a partir de 30 mil km², como neste estudo e nos trabalhos de Hajihosseini et al., (2016) e Gunathilake et al., (2021) houve melhor representação, pois abrangem mais pixels do GPCC.

Entre as bases de dados globais disponíveis, o GPCC 7.0 apresenta uma das maiores variações temporal e espacial, destacando-se como uma combinação excelente com o modelo SWAT. Essa estrutura é particularmente útil para lidar com a escassez de dados na região e a falta de informações de longo prazo sobre variáveis hidrológicas, além de ser um produto de fácil acesso, e ocupa pouco espaço em disco.

O segundo produto com melhor desempenho, na modelagem hidrológica foi o ERA5. Conforme observado na Tabela 5 e nas Figuras 6b, esses resultados corroboram o estudo de Monteiro et al. (2016). Os autores testaram diversos produtos para modelagem de chuva-vazão com o SWAT na bacia da Usina do Pandeiros Montante, no bioma Cerrado, e o ERA5 foi o único produto que obteve resultados satisfatórios para essa aplicação.

No estudo conduzido por Jahanshahi et al. (2024), foram avaliados oito produtos de precipitação e a conclusão foi que o modelo de reanálise climática ERA 5 apresentou o melhor desempenho para a modelagem hidrológica utilizando o modelo SWAT em regiões semiáridas do Irã, onde há escassez de dados pluviométricos observados.

Neste estudo, o CHIRPS ficou em terceiro lugar entre os cinco conjuntos de dados avaliados, apresentando um bom desempenho acima da média, com NSE de 0,6952 na calibração e 0,6180 na validação. De acordo com Dhanesh et al. (2020) e Du et al. (2024), o CHIRPS nem sempre é o melhor produto, mas é consideravelmente bom na captura da precipitação mensal, como podemos observar neste estudo, pois entre os cinco ele ficou em terceiro lugar, podendo ser uma alternativa na falta de outros produtos de precipitação.

O PERSIANN-CDR ficou em quarto lugar no desempenho entre os produtos de precipitação, apresentando um bom desempenho, não muito distante dos valores dos índices estatísticos dos outros produtos. Este resultado é corroborado pelo estudo de Jimeno-Sáez et al. (2021), que avaliaram os produtos CFSR, MSWEP, PERSIANN-CDR, CMORPH e CHIRPS e concluíram que o PERSIANN-CDR foi o conjunto de dados mais adequado e estável para simular a vazão na bacia do rio Grande de San Miguel em El Salvador.

Além disso, TAN et al., (2021) realizaram uma revisão de literatura sobre o uso dos produtos em conjunto com o SWAT e verificaram que o PERSIANN-CDR, juntamente com APHRODITE, CHIRPS e CMADS, compõem o segundo conjunto de produtos mais utilizados, sendo aplicados em 10 a 18% do total de publicações investigadas.

Em último lugar, o produto MSWEP obteve desempenho insatisfatório na calibração e satisfatório na validação, apresentando os piores índices estatísticos entre os cinco produtos.

O estudo de Jimeno-Sáez et al. (2021) analisou cinco produtos de precipitação: CFSR, MSWEP, PERSIAN, CMORPH e CHIRPS. Verificou-se que os produtos PERSIAN e CHIRPS tiveram melhor desempenho nos coeficientes NSE, R^2 e PBIAS em comparação ao MSWEP. Apesar de o MSWEP ter uma resolução espacial superior, ele não foi eficaz na representação das chuvas para gerar vazão em algumas regiões de El Salvador.

O estudo de Aryal et al. (2023) corrobora esses resultados, pois verificaram que o produto MSWEP não foi efetivo na simulação de vazões máximas. Da mesma forma, no trabalho de Swalih e Kahya (2022), também se constatou que o MSWEP não teve efetividade na simulação de vazões.

O MSWEP utiliza diferentes algoritmos, fontes de dados e abordagens para estimar a precipitação global. A correlação entre eles pode variar dependendo da região geográfica, do período de tempo e das condições climáticas específicas. A avaliação da performance de cada sistema depende de vários fatores, incluindo a precisão, a resolução espacial e temporal, e a capacidade de capturar eventos extremos, entre outros fatores (CELANTE, 2020b).

A recomendação do melhor produto de precipitação para estimativas de precipitação no Brasil pode variar conforme a região específica do país, as condições climáticas predominantes, a resolução espacial desejada e outros requisitos específicos. No contexto brasileiro, caracterizado por grande diversidade climática, desde regiões semiáridas até áreas tropicais úmidas, é útil considerar a performance dos produtos de precipitação em diferentes condições. Além disso, a disponibilidade de dados observacionais locais também pode influenciar a escolha do melhor produto de precipitação para uma determinada aplicação.

A vantagem de usar os produtos de precipitação ao invés de dados observados de pluviômetros inclui: (1) os dados históricos observados sem falhas são escassos, contendo apenas quatro estações não dispersas na bacia; (2) esses dados podem estar sujeitos a erros devido ao mau funcionamento dos equipamentos ou erros na coleta dos dados; e (3) existem diferenças significativas entre as informações dos medidores em escala pontual e a precipitação real em uma determinada área.

A Figura 08 apresenta a comparação entre as vazões mensais simuladas a partir de diferentes produtos de precipitação e as vazões observadas. De maneira geral, é possível observar que há diferenças significativas nas vazões simuladas pelos produtos, com destaque aos meses do período seco, entre junho e outubro.

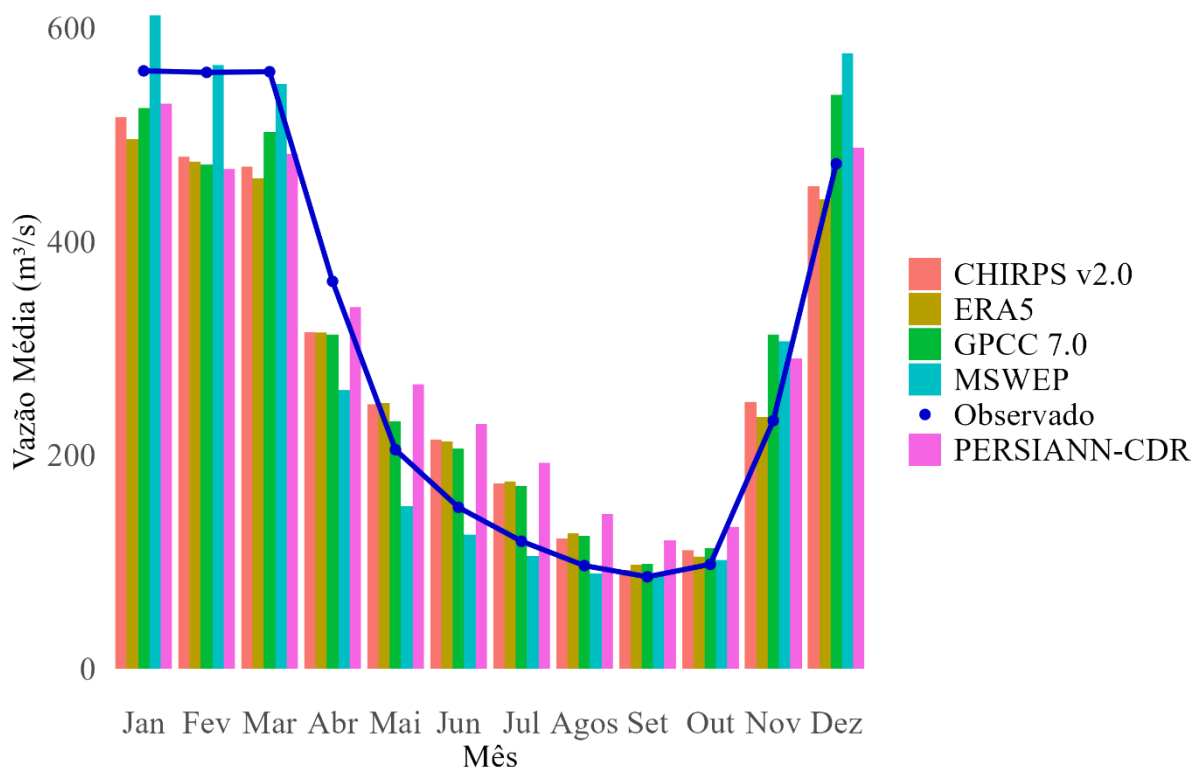


Figura 08. Vazão mensal para os cinco produtos de precipitação no posto fluviométrico Porto Extrema, identificado pelo código 4269000.

O produto GPCC 7.0 apresentou diferenças em relação às vazões observadas, especialmente nos meses de junho (36,4%), julho (43,4%) e agosto (28,4%). Contudo, essas diferenças diminuem nos meses de setembro (13,8%) e outubro (15,1%), indicando uma maior aderência às condições observadas no final do período seco.

As simulações baseadas no CHIRPS v.2.0 revelaram diferenças superiores aos valores observados, em junho (41,9%), julho (45,3%) e agosto (26,4%). Entretanto, em setembro (7,43%) e outubro (13,5%), o produto mostrou desempenho mais próximo da realidade observada, evidenciando uma redução dessas diferenças neste intervalo.

O ERA5 destacou-se por apresentar diferenças moderadas nos meses secos iniciais, com valores de 40,8% em junho, 46,8% em julho e 31,2% em agosto. Enquanto, nos meses de setembro (12,8%) e outubro (7,6%), as diferenças reduziram-se ainda mais, o que pode indicar um desempenho mais consistente desse produto na transição para o período chuvoso.

As estimativas de vazão com o MSWEP foram as que mais se aproximaram das vazões observadas no período seco, com diferenças percentuais de 16,9% em junho, 11,6% em julho, 7,75% em agosto, 3,59% em setembro e 4% em outubro. Esses resultados indicam que o

MSWEP consegue aproximar a vazão simulada nas condições hidrológicas durante o período de estiagem, especialmente em relação aos demais produtos avaliados.

Por outro lado, o PERSIANN-CDR apresentou as maiores diferenças em comparação às vazões observadas, com diferenças de 51,9% em junho, 61,3% em julho, 50% em agosto, 39,6% em setembro e 35,9% em outubro. Esse desempenho inferior sugere que o PERSIANN-CDR possui limitações na representação das vazões durante o período seco na bacia analisada.

Na Figura 9 são apresentados cinco gráficos de dispersão da vazão mensal simulada para os cinco produtos de precipitação.

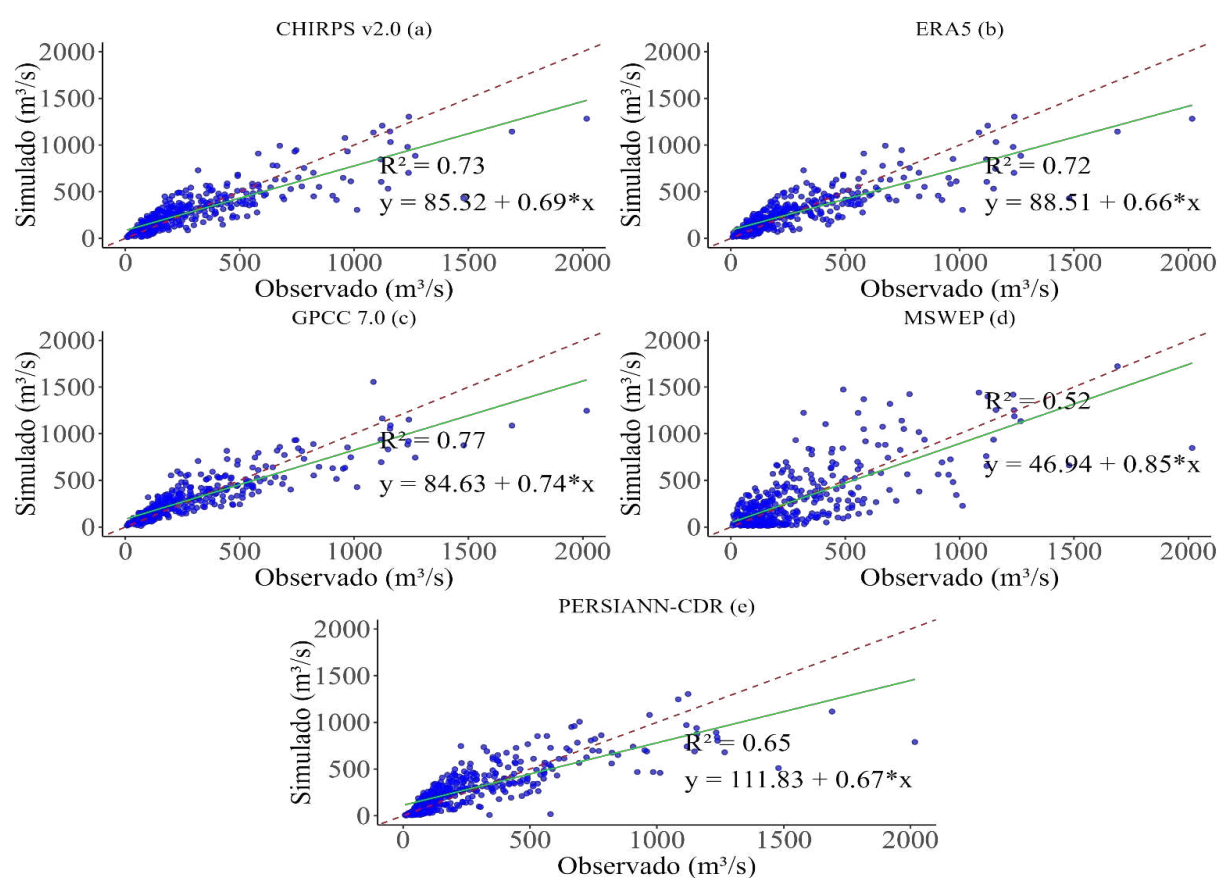


Figura 9. Comparação entre a disponibilidade hídrica mensal, no posto fluviométrico Porto Extrema, simulada pelo modelo SWAT, obtida com os cinco produtos de precipitação e com os dados de precipitação observados. A reta tracejada representa a relação 1:1 e sólida representa a reta de regressão.

Com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,73, o CHIRPS v.2.0 (Figura 9a) apresentou um bom desempenho, principalmente para valores menores que 1000 m³/s. Esses resultados indicam que o CHIRPS v.2.0 é uma fonte confiável de dados de entrada para precipitação na modelagem hidrológica PFPE, para representação das vazões. O desempenho

do CHIRPS v.2.0 é corroborado pelo trabalho de Dhanesh et al., (2020), que analisou a hidrologia de dez bacias hidrográficas ao redor do mundo. Nesse estudo, os autores compararam os produtos CHIRPS e CFSR na modelagem hidrológica e concluíram que apenas o CHIRPS apresentou bom desempenho. A robustez do CHIRPS foi atribuída à sua capacidade de integrar dados de estações meteorológicas com dados de satélites com espectroscopia de infravermelho termal (Thermal Infrared, TIR) combinadas em uma resolução espacial de 5,6 km, tornando-o adequado para diferentes zonas climáticas.

No estudo de Luo et al., (2019), foi realizada análise hidrológica com modelo SWAT na bacia do baixo rio Lancang-Mekong. Foi utilizado dados de precipitação dos produtos CHIRPS e TRMM. Estes produtos de precipitação demonstraram êxito ao modelar a vazão na área com escassez de dados observacionais. Apesar do TRMM ter apresentado desempenho superior neste caso, o CHIRPS destaca-se pela sua série temporal mais longa, o que o torna uma ferramenta valiosa para estudos que requerem análises de longo prazo.

A Figura 9(b) apresenta o desempenho do produto de precipitação ERA5, que alcançou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,72, apenas 1% menor que o obtido pelo CHIRPS (0,73). Esse resultado demonstra que o ERA5 também possui uma boa capacidade preditiva de vazão, sendo eficiente na simulação de vazões. No entanto, em vazões superiores a 1000 m³/s, obtiveram uma maior dispersão em relação à linha 1:1, indicando limitações do produto na representação de eventos de vazão elevadas.

Apesar de possuir uma resolução espacial mais grosseira (25 km), inferior à resolução do CHIRPS (5,6 km), o ERA5 conseguiu representar as vazões na bacia, destacando-se como o terceiro melhor ajuste entre os produtos analisados, atrás do GPCC 7.0 e do CHIRPS v2.0. Sua robustez é atribuída ao fato de ser um produto de reanálise (HERSBACH et al., 2020), que combina observações meteorológicas com modelos numéricos de previsão do tempo.

No estudo de Jahanshahi et al. (2024), o ERA5 foi testado junto com outros oito produtos de precipitação como dados de entrada para o modelo SWAT nas bacias dos rios Dehroud e Jazmourian, no Irã. Os resultados mostraram que, em escala mensal, o ERA5, junto com o GPM, apresentou a melhor concordância com os dados observados, demonstrando potencial para suplementar dados de precipitação em modelos hidrológicos, especialmente em regiões com dados observacionais limitados.

Kolluru et al. (2020), avaliaram os produtos ERA5, CHIRPS e ECMWF nas bacias dos rios Nethravathi, Ponnaiyar, Hiran e Tungabhadra, na Índia, utilizando o modelo SWAT. Os autores observaram que o ERA5 apresentou melhor desempenho na detecção de chuvas de baixa intensidade (0–5 mm/h) e média intensidade (6–25 mm/h), enquanto o CHIRPS v.2.0 foi

mais eficaz na detecção de eventos de alta intensidade (>25 mm/h). Isso evidencia que o ERA5 pode ser uma fonte para análises hidrológicas em diferentes regimes de precipitação, especialmente em cenários que requerem maior precisão para eventos de baixa e média intensidade.

Esses resultados mostram que o ERA5 é uma ferramenta valiosa para modelagem hidrológica, com capacidade de representar bem a vazão, mesmo quando comparado a produtos de resolução mais alta, como o CHIRPS v2.0. Sua ampla aplicabilidade em diferentes contextos climáticos reforça sua utilidade em estudos hidrológicos e climáticos.

Na Figura 9(c) apresenta o maior coeficiente de determinação (R^2), com valor de 0,77, para o produto GPCC, indicando bom desempenho na captura de vazões observadas, pois apresenta a melhor correspondência entre vazão observada e as vazões simuladas. Apesar que o produto apresenta resolução mais grosseira de 111 km, possui uma rede global de 126.000 estações pluviométricas calibradas (SCHIRMEISTER et al. 2024; SCHNEIDER et al., 2014), que utiliza métodos robustos de processamento e ajuste de dados baseados em dados terrestres observado que compensam a perda de detalhamento espacial, além de um controle de qualidade rigoroso, contribuindo para uma menor dispersão.

No trabalho de Fu et al. (2016) na bacia do rio Principal na China, obteve boa representação do produto GPCC, bons índices de desempenho. Enquanto o estudo de Eini (2021), que foi realizado na bacia do rio Dong Nai, Vietnã, os produtos de precipitação TRMM e GPCC 7.0 conseguiram representaram a vazão observada na modelagem hidrológica, com coeficiente de determinação para vazão simulada de 0,2 e 0,73, respectivamente.

Na figura 9(d), referente ao produto MSWEP, demonstra um coeficiente de determinação (R^2) com valor de 0,52, o menor entre os produtos analisados neste estudo. Este valor evidencia uma menor capacidade do produto em prever a variabilidade das vazões observadas na BHRP. A dispersão dos pontos em relação à linha 1:1 indica padrões de subestimação para as vazões mais altas e superestimação para as vazões mais baixas, destacando as limitações do MSWEP na representação precisa de eventos extremos de vazão.

Lv et al. (2022), analisaram o desempenho do MSWEP, junto com outros produtos de precipitação (TRMM, IMERG e CMADS), na modelagem hidrológica com o modelo SWAT na bacia do rio Qaidam, na China. Nesse estudo, o MSWEP apresentou um coeficiente (R^2) de 0,64, cerca de 12% superior ao encontrado neste trabalho (0,52). Embora esse resultado indique um desempenho levemente melhor em outra região, ainda assim, o R^2 obtido pelo MSWEP foi considerado baixo em comparação com outros produtos analisados neste trabalho. Isso sugere

que o desempenho do MSWEP pode variar dependendo das características da região e dos dados disponíveis.

Swalih; Kahya (2022), avaliaram o MSWEP na bacia do rio Ikizdere, na região do Mar Negro Oriental, na Turquia, em comparação com os produtos CFSR, ERA5 e APHRODITE. Nesse estudo, o MSWEP obteve $R^2= 0,61$, o que representa um desempenho razoável, mas ainda inferior ao CFSR ($R^2= 0,77$) e ao APHRODITE ($R^2=0,75$). Além disso, os autores também identificaram que o MSWEP apresentou problemas similares de subestimação e superestimação em períodos específicos do ano, reforçando as limitações observadas neste estudo.

De acordo com Qi et al. (2024); Beck et al. (2017), o produto de precipitação MSWEP se destaca pela alta resolução de 11 km, cobertura global e um longo registro inicia em 1979. Combina estimativas de precipitação obtidas de diferentes fontes, como dados de estações pluviométricas, satélites e reanálises, o que lhe confere potencial para estudos hidrológicos em diversas regiões e escalas. No entanto, o MSWEP apresenta algumas limitações, incluindo a subestimação de valores de precipitação, que pode impactar negativamente sua acurácia em determinadas situações, além disso, não possui um controle de qualidade, para corrigir dados diários de pluviômetros.

Na figura 9(e) apresenta o desempenho do produto de precipitação PERSIANN-CDR, que alcançou um coeficiente de determinação (R^2) com valor de 0,65) posicionando-o como o quarto mais eficiente entre os produtos analisados. Muitos pontos do gráfico se alinham próximo à linha 1:1, indicando boa capacidade de representação das vazões médias e baixas. Contudo, uma maior dispersão é observada em valores de vazão superiores a 1000 m³/s.

Eini et al. (2018), avaliaram o desempenho do PERSIANN-CDR na modelagem hidrológica da bacia do Lago Maharloo, no Irã, utilizando o modelo SWAT. O valor de R^2 alcançado foi de 0,65, exatamente o mesmo valor encontrado neste trabalho. Os autores destacaram que o PERSIANN-CDR apresentou dificuldades em prever vazões máximas e teve limitações em captar a variabilidade espacial e temporal da precipitação em regiões áridas. Isso reforça os resultados apresentados no gráfico (e), com maior dispersão em vazões altas.

Barezaei e Jalali (2023), compararam o desempenho do PERSIANN-CDR com dados de pluviômetros na bacia de Chelgerd, também no Irã, utilizando o SWAT, os autores verificaram que o R^2 do PERSIANN-CDR foi de 0,79, enquanto os dados de pluviômetros alcançaram o valor de 0,82. Essa diferença de 3% indica que o PERSIANN-CDR foi eficaz em simular vazões, demonstrando bom desempenho, mesmo em comparação com dados de

pluviômetros. Este resultado evidencia que, em algumas condições regionais, o PERSIANN-CDR pode ser uma alternativa confiável para dados pluviométricos.

Sadeghi et al. (2021), descreveram o PERSIANN-CDR como um produto desenvolvido com foco em eventos extremos de precipitação, como tempestades convectivas e furacões. O algoritmo utiliza redes neurais adaptativas para integrar informações de diversos satélites, incluindo imagens infravermelhas de alta frequência (48 leituras diárias) e dados de chuva instantânea de baixa frequência (2 leituras diárias). Essa abordagem permite maior capacidade de detecção de eventos extremos, mas, como os resultados deste trabalho sugerem, ainda há limitações na representação precisa de vazões máximas.

Para fins de análise de disponibilidade hídrica, a curva de permanência é um instrumento valioso, pois possibilita, entre outras coisas, visualizar a potencialidade natural do rio, destacando a vazão mínima e o grau de permanência de qualquer vazão no tempo.

A Figura 10 exibe a curva de permanência das vazões simuladas pelos cinco produtos de precipitação para a estação fluviométrica de Porto Extrema, localizada na bacia do rio Paracatu. Este gráfico é uma ferramenta fundamental para a análise da disponibilidade hídrica ao longo de um período extenso (1988 a 2018), pois indica a frequência com que diferentes níveis de vazão são igualados ou superados.

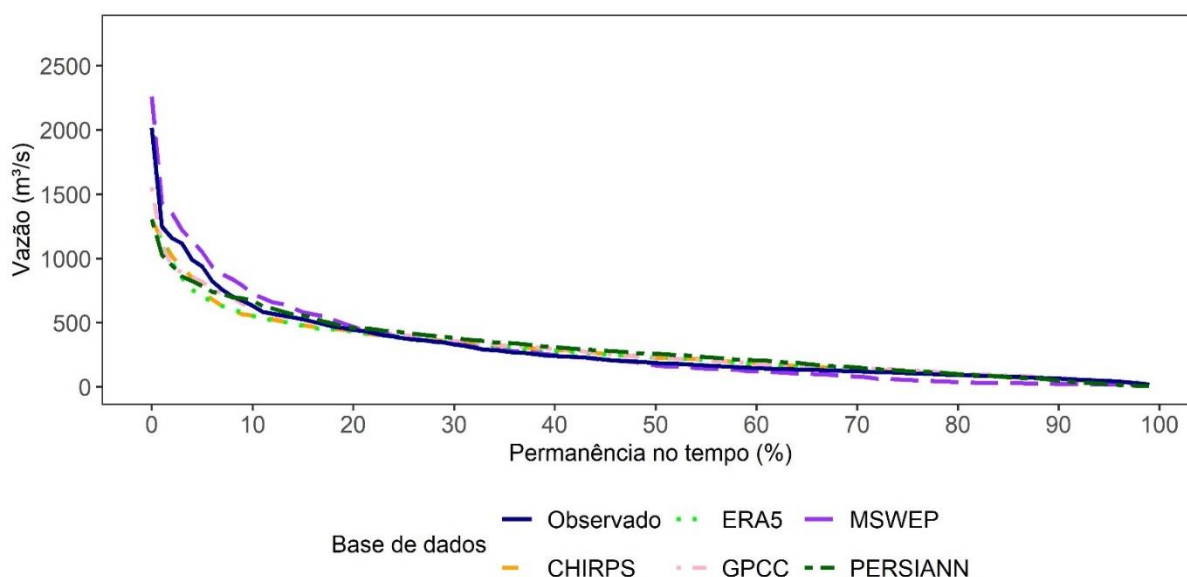


Figura 10. Gráfico da curva de permanência da vazão simulada dos produtos de precipitação da bacia do rio Paracatu.

O produto GPCC, representado pela linha rosa, apresentou o melhor desempenho entre os produtos analisados. O valor simulado da vazão de referência Q95 foi de 47,04 m³/s, enquanto do dado observado foi de 46,07 m³/s, resultando em uma diferença de apenas 0,97 m³/s. Esse resultado evidencia a maior proximidade do GPCC em relação aos dados observados.

O produto ERA5, representado pela linha verde, obteve o segundo melhor desempenho. O valor simulado da vazão de referência Q95 foi de 43,14 m³/s, com uma diferença de 2,93 m³/s em relação ao dado observado (46,07 m³/s), confirmando sua capacidade satisfatória em representar as vazões.

O produto CHIRPS v2.0, indicado pela linha laranja, apresentou o valor de 40,90 m³/s para vazão de referência Q95, enquanto o dado observado foi de 46,07 m³/s, resultando em uma diferença de 5,17 m³/s. Esse desempenho o posiciona como o terceiro melhor, entre os produtos na representação das vazões.

O produto PERSIANN-CDR, representado pela linha verde escuro, obteve um valor de 21,20 m³/s para a vazão de referência Q95, apresentando uma diferença de 24,87 m³/s em relação ao dado observado (46,07 m³/s). Esse resultado posiciona o PERSIANN como o quarto produto, evidenciando uma subestimação significativa das vazões mínimas de referência.

O produto MSWEP, representado pela linha roxa, apresentou o menor desempenho entre os produtos analisados. Com valor de 18,91 m³/s para a vazão de referência Q95, com uma diferença de 26,16 m³/s em relação ao dado observado (46,07 m³/s), caracterizando a maior subestimação e o pior desempenho.

Estimativas das vazões mínimas são essenciais na gestão de recursos hídricos. As vazões de referência, como a Q95, são utilizadas como critério de outorga. Para avaliar a acurácia das vazões simuladas utilizando os diferentes produtos de precipitação, foi realizado o teste estatístico de Mann-Whitney (Tabela 5). Esse teste estatístico compara as vazões observadas com as simuladas dos produtos de precipitação (CHIRPS v2.0, ERA5, GPCC 7.0, MSWEP, PERSIANN-CDR). Este teste avalia a maior diferença absoluta entre as distribuições acumuladas das séries de vazão observada e simulada, gerando dois indicadores: o valor da estatística (w), que representa a magnitude da discrepância, e o (p_valor), que quantifica a significância estatística dessa diferença.

Tabela 5. Tabela contendo valores do teste estatístico Mann-Whitney.

Base de Dados	W	p_valor
Observado/CHIRPS	1339	0,5418
Observado/ERA5	1334	0,5649
Observado/GPCC	1379	0,3757
Observado/MSWEP	1158	0,5282
Observado/PERSIANN-CDR	1104	0,3158

Ao verificar a tabela 5, indica que, para todos os produtos de precipitação avaliados, os p_valor obtidos foram superiores a 0,05. Este resultado indica que as vazões simuladas pelos produtos de precipitação são estatisticamente equivalentes às vazões observadas, ou seja, não houve diferença estatística entre os dados. Assim, as diferenças entre as distribuições acumuladas dos dados observados e simulados não são relevantes para comprometer a equivalência entre as séries.

Analisando os resultados em termos da diferença absoluta, observou-se que o produto GPCC 7.0, representado pela linha rosa tracejada, apresentou o melhor desempenho. O valor simulado da vazão de referência Q95 foi igual a 47,0 m³/s, valor 2% maior que o valor calculado com os dados observados. O produto MSWEP apresentou o pior desempenho entre os produtos analisados. Com valor igual a 18,9 m³/s, sendo 26,2 m³/s menor que o valor calculado com os dados observados.

2.2.4. Conclusões

Os produtos de precipitação apresentaram melhor acurácia na estimativa da disponibilidade hídrica foram o GPCC 7.0, ERA5 e CHIRPS v2.0.

O produto GPCC 7.0 foi o produto mais acurado entre os cinco testados, destacando-se pelos melhores índices estatísticos. O NSE, atingiu valores de 0,75 na calibração e 0,80 na validação; o KGE apresentou valores de 0,7766 calibração e 0,8540 validação; o PBIAS foi de 3,2% na calibração e 2,4% na validação; e o coeficiente de determinação (R²) obteve 0,76 na calibração e 0,80 na validação. Além disso, o GPCC 7.0 apresentou a menor diferença entre os valores observados e simulados para a vazão de referência Q95, com uma diferença de apenas 0,97 m³/s.

O segundo melhor desempenho foi do produto ERA5, com os seguintes índices estatísticos: o NSE apresentou valores de 0,7250 na calibração e 0,7496 na validação; o KGE foi de 0,7873 na calibração e 0,8118 na validação; o PBIAS indicou valores de -7% na calibração e 0,1% na validação; e o R² alcançou 0,73 na calibração e 0,75 na validação. Além disso, o ERA5 obteve a segunda menor diferença entre os valores observados e simulados para a vazão de referência Q95, com uma diferença de 2,93 m³/s.

O terceiro melhor desempenho foi registrado para o produto CHIRPS v2.0, com os seguintes índices estatísticos: o NSE atingiu 0,69 na calibração e 0,61 na validação; o KGE apresentou valores de 0,70 na calibração e 0,79 na validação; o PBIAS foi de -4,4% na calibração e 3,1% na validação; e o R² alcançou 0,70 na calibração e 0,64 na validação. O CHIRPS v2.0 apresentou a terceira menor diferença entre os valores observados e simulados para a vazão de referência Q95, com valor de 5,17 m³/s.

Portanto, este estudo demonstrou que o GPCC 7.0 é o produto mais adequado para estimar a disponibilidade hídrica na bacia do rio Paracatu, seguido pelo ERA5 e pelo CHIRPS v2.0. A seleção de produtos de precipitação para modelagem hidrológica não depende apenas da resolução espacial, mas também depende da base de dados que o produto possui, para que assim o produto tenha capacidade de captar a variabilidade hidrológica da região.

2.3 Impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Paracatu

Resumo

A região do Cerrado, produzindo cerca de 60 % da produção agrícola brasileira, é conhecida pela sua importância para a economia brasileira. A maior parte da agricultura praticada nessa região é de sequeiro. Tem-se observado, entretanto, um crescimento contínuo da irrigação na região, o que contribui para reduzir às incertezas climáticas e trazer sustentabilidade para a produção de alimentos. Em regiões, como, por exemplo, a da bacia hidrográfica do rio Paracatu, o crescimento da irrigação precisa ser mais bem planejado, para reduzir as disputas pelo uso de recursos hídricos. Mediante evidências de que o clima global está se alterando, períodos de escassez hídricas podem ser agravados, indicando a necessidade de um planejamento cada vez mais estratégico. Nesse contexto, é necessário quantificar adequadamente a disponibilidade hídrica e realizar estudos preditivos de escassez a fim de subsidiar medidas prévias para mitigar possíveis prejuízos. Este trabalho teve como objetivo principal avaliar comportamento da vazão em cenários futuros de mudanças climáticas na bacia hidrográfica do rio Paracatu. Para isso, foram utilizados os dados diários da projeção climática do modelo MIROC6, para os cenários RPC 4.5 e RPC 8.5. O comportamento da vazão foi avaliado para os períodos de 1985 a 2013 (histórico), 2014 e 2041, 2042 e 2069 e de 2070 a 2100, utilizando o modelo hidrológico SWAT (Soil and Water). A vazão mínima mensal, no cenário RCP 4.5, foi de 0 m³/s, nos períodos de 1985 a 2013, 2014 e 2041, 2042 e 2069, 2070 a 2100. No cenário RPC 8.5 a vazão mínima mensal para período de 1985 a 2013, foi de 12,40 m³/s, diminuindo para 11,11 m³/s, entre 2014 e 2041, 9,82 m³/s, entre 2042 e 2069, e 7,83 m³/s no período de 2070 a 2100. Portanto a disponibilidade hídrica da bacia do rio Paracatu será comprometida no final do século 2100, havendo a necessidade de estratégias adaptativas para a gestão dos recursos hídricos na região, visando mitigar os impactos da escassez hídrica no futuro.

Palavras Chaves: recursos hídricos, hidrologia, MIROC6, SWAT, escassez hídrica.

2.3.1 Introdução

O Cerrado é uma região estratégica para a economia brasileira. É cada vez maior a preocupação da sociedade com essa região, principalmente no que diz respeito à disponibilidade hídrica e sua capacidade de sustentar o desenvolvimento na região. Estratégico para o desenvolvimento do semiárido, a bacia hidrográfica do rio São Francisco tem cerca de 46,7% da sua área de drenagem no Cerrado, que contribui com 74,8% da sua disponibilidade hídrica (RODRIGUES, 2023).

O rio São Francisco contribui com 69% das águas superficiais e 73% da disponibilidade hídrica superficial, assegurado no Nordeste, desempenhando um papel crucial para o desenvolvimento da região (CARVALHO et al., 2024; RAMOS; PRUSKI, 2003).

Localizada na região do Médio São Francisco, a bacia hidrográfica do rio Paracatu drena uma área aproximada de 45.600 km², equivalente a 7,3% da área total da bacia do São Francisco. Apesar de sua menor extensão, ela se destaca por contribuir com 20,8% da vazão total do rio São Francisco (RIBEIRO et al., 2024; PRUSKI et al., 2007).

A bacia hidrográfica do rio Paracatu enfrenta desafios relacionados à escassez hídrica em algumas de suas regiões. Nesse contexto, é fundamental realizar estratégias de gestão dos recursos hídricos e políticas públicas eficientes, visando assegurar a produção agrícola e fomentar o desenvolvimento econômico como uma estratégia de diminuir a pobreza. (COSTA et al., 2021).

Nesse cenário, a modelagem hidrológica surge como uma ferramenta fundamental, permitindo uma análise mais detalhada do comportamento hidrológico de uma bacia (RIBEIRO et al., 2024). Além disso, sua integração com modelos climáticos potencializa a realização de estudos preditivos sobre escassez de água e fornece subsídios para a adoção de ações preventivas visando mitigar impactos adversos (ANDRADE FARIAS et al., 2023).

O agravamento da variabilidade climática e o crescimento das incertezas tornam o gerenciamento de recursos hídricos cada vez mais dependente de instrumentos eficazes, demandando estratégias de gestão proativas e preventivas para mitigar possíveis impactos. (SOUZA et al., 2023).

Nesse cenário, a aplicação de modelos climáticos para previsões de curto e médio prazo surge como uma estratégia valiosa para obter dados sobre a demanda hídrica das culturas agrícolas e o comportamento do regime hídrico em uma bacia específica. A previsão de eventos climáticos extremos dentro de um período que permita decisões antecipadas apresenta um

potencial significativo para promover a gestão sustentável dos recursos hídricos (RANKE et al., 2025).

Os modelos de circulação geral (MCG) são frequentemente utilizados para obter previsões climáticas, com escalas espaciais variando de 240 a 600 km, em contrapartida essa resolução pode não ser adequada para análises de impactos em nível local. Nesses casos, a solução é uso dos modelos climáticos regionais, que, por meio de técnicas de downscaling, integram características específicas do local, como topografia, cobertura vegetal e tipos de solo, ausentes nos modelos globais (SOUZA et al., 2021; FARIAS et al., 2020; ALVES et al., 2017).

Existem inúmeros modelos de simulação numérica que podem ser utilizados nas previsões, tais como BRAMS (Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System) (RODRIGUES et al., 2019), WRF (Weather Research and Forecasting) (SKAMAROCK et al., 2019), RAMS (Regional Atmospheric Modelling System) (MASCITELLI et al., 2019), entre outros.

As projeções de mudanças climáticas globais e seus possíveis efeitos no ciclo hidrológico exigem adaptações no gerenciamento atual dos recursos hídricos (GRAHAM, 2004; IGLESIAS; GARROTE, 2015; MEDELLÍN-AZUARA et al., 2008), tornando essencial a avaliação de seus impactos no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas do Cerrado.

Atualmente, no Brasil, as previsões são geradas a partir do modelo regional de previsão do tempo (Eta). Este modelo é utilizado para previsão de tempo desde 1997 e, para previsões climáticas sazonais, desde 2002, pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE).

As projeções climáticas futuras utilizam modelos do sistema terrestre forçados por cenários de emissões de gases de efeito estufa (GEE), que refletem diferentes trajetórias de desenvolvimento socioeconômico. Esses cenários, propostos pelo IPCC em relatórios são baseados em fatores como crescimento populacional, economia e uso de energia, buscando representar possíveis caminhos futuros para a humanidade e suas implicações climáticas.

Um dos modelos climáticos mais utilizados no Brasil é o Eta, que foi criado National Centers for Environmental Prediction (NCEP), dos Estados Unidos, e posteriormente adaptado para o Brasil pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE). É um modelo ligado aos modelos globais como HadGEM2-ES e MIROC, com aplicações que incluem projeções de precipitação, evapotranspiração e demandas hídricas agrícolas (CHOU et al., 2020; REBOITA et al., 2022; CHOU et al., 2014).

O *Weather Research and Forecasting* (WRF), foi criado por um consórcio de instituições dos Estados Unidos, liderado pelo NCAR e pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), é um modelo numérico de previsão do tempo e pesquisa climática amplamente utilizado na meteorologia e em estudos climáticos no Brasil com resolução espacial de 3 km. Vem sendo utilizado na estimativa da demanda hídrica em regiões agrícolas e urbanas, especialmente na modelagem de cenários futuros de disponibilidade hídrica. (TUY et al., 2022 ; SKAMAROCK et al., 2019).

O modelo *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS), criado pela *Colorado State University* (CSU) em colaboração com a *Mission Research Corporation* (MRC) nos Estados Unidos, é modelo numérico de previsão e simulação atmosférica. A resolução espacial pode variar de 1 a 50 km dependendo do produto escolhido para determinada aplicação. Esse modelo foi projetado para estudar e prever processos climáticos e meteorológicos em escalas regionais e locais (MOGHIM; IMANI, 2023; MASCITELLI et al., 2019).

Embora diversos estudos tenham avaliado a qualidade das previsões climáticas na estimativa da demanda hídrica no (FERREIRA et al., 2024; CAMBRAIA NETO et al., 2021; ALTHOFF et al., 2020), poucos se concentraram nos impactos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade futura de vazão dos rios.

O estudo de Ferreira et al. (2024), realizado no Cerrado brasileiro, avaliou o desempenho do modelo climático regional Eta, acoplado ao modelo global HadGEM2-ES, na simulação de precipitação e temperatura média em diferentes localidades da região. Os resultados indicaram uma tendência de redução na precipitação e aumento na temperatura média, previstos para ocorrer até o final do século XXI, ressaltando os potenciais impactos climáticos na região.

O estudo de Cambraia Neto et al. (2021) analisou o impacto das mudanças climáticas globais na recarga de águas subterrâneas em uma bacia hidrográfica do Cerrado brasileiro. Para isso, utilizou o modelo climático regional Eta, acoplado aos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5, para projetar alterações na precipitação e suas implicações na recarga hídrica subterrânea, considerando os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5. Os resultados indicaram que, no cenário mais pessimista (RCP 8.5), a recarga média mensal das águas subterrâneas apresenta redução significativa, especialmente no início e no final da estação chuvosa.

O estudo de Althoff et al., (2020), avaliou os impactos projetados das mudanças climáticas na evaporação e na disponibilidade hídrica de pequenos reservatórios no Cerrado, utilizando dados dos modelos climáticos regionais Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. Os resultados indicaram que o aumento na evaporação, especialmente durante a estação seca,

levando a uma redução significativa na disponibilidade de água nesses reservatórios, destacando os desafios adicionais para a gestão hídrica na região.

Embora os dados do modelo MIROC tenham sido utilizados em estudos anteriores (PEREIRA, 2021; SANTOSA et al., 2020; SILVA, 2021) para verificar o impacto das mudanças climáticas na disponibilidade de água, esses estudos deram pouca atenção para a redução futura de vazão dos rios. Até agora, há poucos estudos sobre o impacto das mudanças climáticas na dinâmica da disponibilidade de vazão (COSTA et al., 2021; SOUZA et al., 2010), especialmente na bacia hidrográfica do Rio Paracatu. No entanto, é crucial expandir essa pesquisa para compreender melhor como as mudanças climáticas afetarão a disponibilidade hídrica futura.

Nesse contexto, este trabalho tem o objetivo de avaliar comportamento da vazão em cenários futuros de mudanças climáticas na bacia do Rio Paracatu, utilizando o modelo SWAT a partir de dados de índice climáticos extremos do MCR MIROC6 sob dois cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

2.3.2 Materiais e Métodos

2.3.2.1 Área de Estudo

Para avaliar a acurácia de dados de precipitação por satélite foi utilizada como referência a bacia hidrográfica do rio Paracatu (BHRP), que possui área de drenagem de aproximadamente 44.642,3895 km² (Figura 1). Para fins de avaliação do comportamento da vazão em cenários futuros de mudanças climáticas, foi utilizado o posto fluviométrico Porto Extrema, identificado pelo código 42690001, localizado a uma latitude de 17,03° Sul, longitude 46,06° Oeste e altitude de 475 metros (Figura 1). Esse posto fluviométrico possui área de drenagem de 29.913,0899 km², representando 67 % da área total da BHRP.

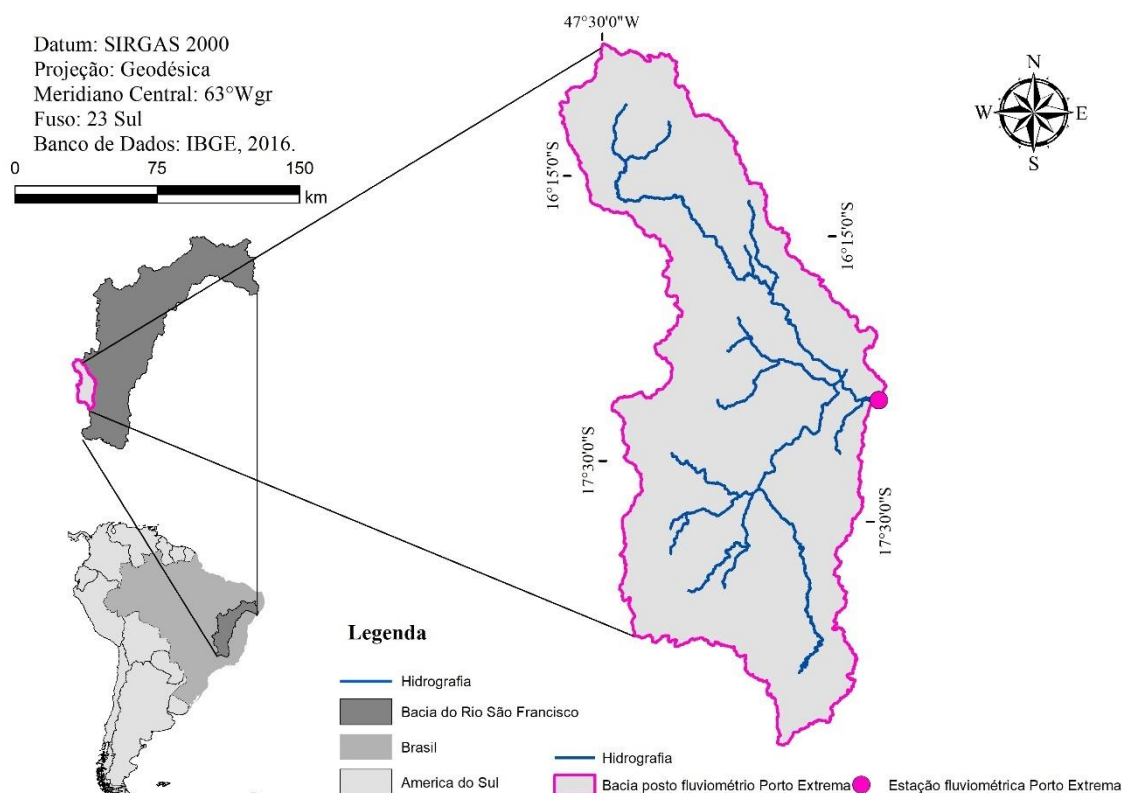


Figura 1. Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu no contexto do Brasil e da bacia hidrográfica do rio São Francisco, com destaque para as estações fluviométricas Porto Extrema.

O clima da bacia Hidrográfica do rio Paracatu (BHRP) é classificado como tropical úmido, com um período chuvoso que se estende de outubro a março, quando ocorre cerca de 93% da precipitação anual. Nesse período, os meses de novembro, dezembro e janeiro se destacam por apresentarem os maiores volumes de chuva.

O período de menor precipitação na Bacia Hidrográfica do rio Paracatu ocorre entre os meses de abril e setembro (HOBBI et al., 2022; BECK et al., 2020). A região apresenta uma evapotranspiração média anual de 1200 mm e temperaturas médias anuais que variam entre 22 e 24 °C (SOUZA et al., 2023; RIBEIRO et al., 2022). A precipitação média anual é de aproximadamente 1400 mm (ALTHOFF et al., 2020).

Os solos predominantes na região da Bacia Hidrográfica do rio Paracatu incluem os Latossolos Vermelho-Amarelos, que ocupam cerca de 37% da área, e os Neossolos Litólicos, com aproximadamente 27%. Os Latossolos Vermelho-Amarelos são profundos, bem drenados e altamente intemperizados, localizados principalmente em áreas de relevo plano a suave-ondulado. Por outro lado, os Neossolos Litólicos são rasos, bem drenados e também predominam em terrenos planos ou de suave ondulação (RODRIGUES, 2023).

A BHRP possui uma altitude média de 701 metros, com relevo predominantemente suave ondulado, representando cerca de 41,68% de sua área. Em 2018, a ocupação do solo na região era composta por aproximadamente 37% de pastagens, 23% de formações naturais savânicas, 15% de áreas destinadas a lavouras, 11% de formações naturais florestais e 14% destinados a outros usos múltiplos (MAPBIOMAS, 2018).

2.3.2.2 Dados Climáticos

Neste estudo, foram utilizados dados diários da projeção climática de alta resolução do modelo climático *Model for Interdisciplinary Research on Climate*, versão 6 (MIROC6), do *Santander Met Group* (SMT), processados no pacote *Climate4R* em linguagem R, um dos 19 modelos de clima global do CMIP6 usados para gerar projeções de variáveis meteorológicas e hidrológicas para o Brasil (BALLARIN et al., 2023), que possui resolução espacial de aproximadamente $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ cobrindo toda área do Brasil, que possui correção de viés realizada pelo método *Quantile Delta Mapping* (QDM).

Foram utilizados os cenários denominados Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (*Shared Socioeconomic Pathways*, SSP). O cenário SSP2-4.5 é uma atualização do cenário RCP 4.5 do CMIP5 e possui a forçante radiativa é de $4,5 \text{ W/m}^2$. Esse cenário pressupõe políticas de mitigação moderadas, levando a um aquecimento global moderado e pessimista.

Já o cenário SSP-8.5, é uma atualização do cenário RCP 8.5 do CMIP5 possui a forçante radiativa de $8,5 \text{ W/m}^2$, com característica de aumento repentino da emissão de gases de efeito estufa até de 2100. Este cenário representa um caminho sem políticas climáticas, levando a um aquecimento exagerado, frequentemente usado como "cenário de pior caso."

Este conjunto de dados está disponível publicamente em <https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.02316> no formato netCDF. As condições de contorno e condições iniciais são derivadas do *Model for Interdisciplinary Research on Climate*, versão 6.

Para a escolha do modelo MIROC6, foi realizada uma revisão de literatura com o objetivo de identificar estudos aplicados na BHRP que utilizaram modelos climáticos futuros. Foram encontrados trabalhos de Cambraia Neto et al. (2021) e Althoff et al. (2020), que empregaram os modelos HadGEM2-ES e MIROC5. No entanto, como o conjunto de dados de Ballarin et al. (2023) não incluía o HadGEM2-ES, optou-se por utilizar apenas os dados do MIROC. Essa escolha possibilitou a comparação dos resultados obtidos nos estudos mencionados com os do presente trabalho.

2.3.2.3 Dados Históricos observados da bacia do Rio Paracatu para correção de viés

A base de dados necessária para simulação hidrológica com o modelo SWAT é constituída por dados tabulares e espaciais. As informações espaciais são constituídas pelos mapas de uso e cobertura do solo, tipo de solos e o modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado. Os dados tabulares constituem o banco de dados com informações quantitativas sobre clima, vegetação, solos, aquíferos, vazão, manejo, etc.

Os principais dados de entrada para a modelagem hidrológica da BHRP estão sumarizados na tabela 1 e apresentados na figura 2.

Tabela 1. Descrição dos dados espaciais utilizados no modelo SWAT.

ID	Dado	Resolução	Período	Fonte
1	Vazão	-	1988 a 2018	https://www.snirh.gov.br/hidroweb/series-historicas
2	Variáveis MIROC	120 km	1980 a 2100	https://www.scidb.cn/en/detail?dataSetId=609b7ff93f0d4d1a9ba6eb709027c6ad
3	MDEHC	30 m	-	https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=C1546314043-LPDAAC_ECS
4	Solos	-	-	https://geofp.ibge.gov.br/informacoes-ambientais/pedologia/vetores/escala_250_mil/

Na Figura 2 apresenta-se mapas da área de drenagem da BHRP, com destaque para as estações pluviométricas, fluviométricas e climatológicas, Figura (a), pedologia, Figura (b), relevo, Figura (c) e uso do solo, Figura (d).

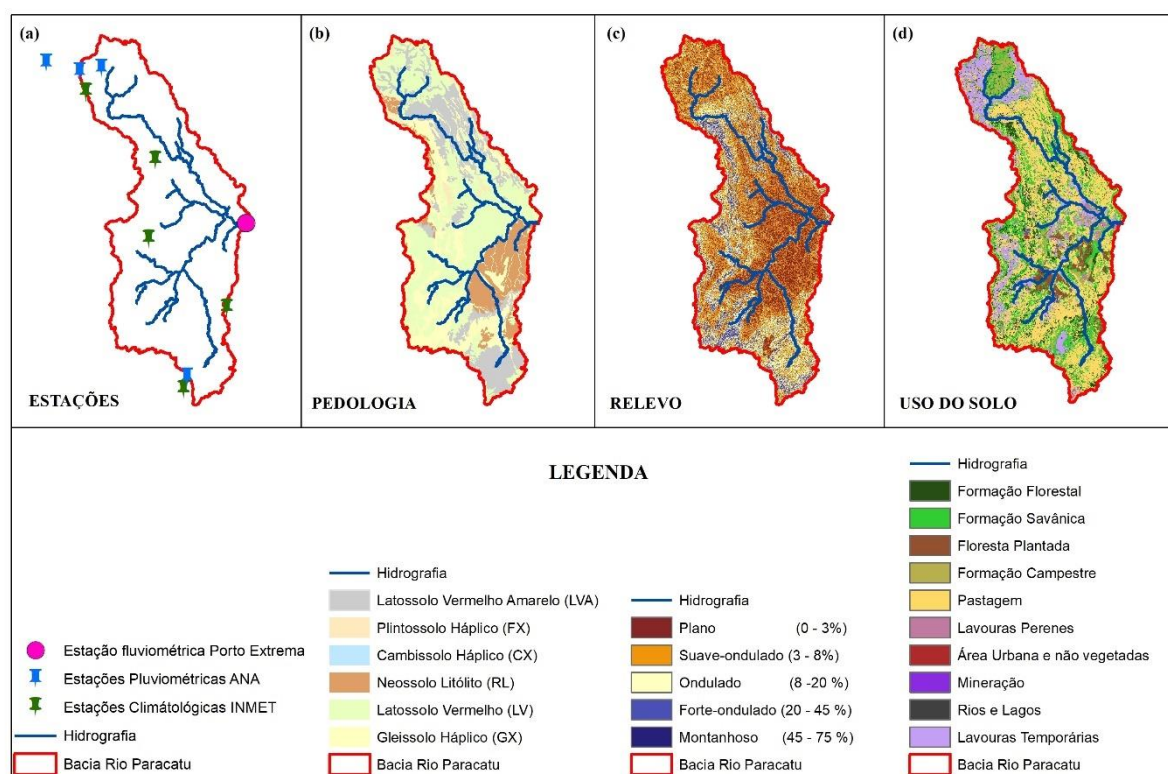


Figura 2. Mapa de estações pluviométricas (a), fluviométricas, climatológicas (a), pedologia (b), relevo (c) e uso do solo (d).

A evapotranspiração de referência foi estimada pelo método de Penman- Monteith (MONTEITH, 1965). Para isto foi utilizado dados diários de temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar, referente a sete estações climatológicas, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Figura 2a, para o período de 1988 a 2018 (30 anos de dados) (<https://bdmep.inmet.gov.br/#>).

O Modelo Hidrológicamente Condicionado (MDEHC) foi elaborado a partir dos dados NASADEM (<https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=nasadem>) (NASA JPL, 2020). O mapa de solos foi obtido através do GEOINFO (Infraestrutura de Dados Espaciais da Embrapa), no formato vetorial de *shapefile*, com escala exploratória de 1: 5.000 (https://geoinfo.cnpm.embrapa.br/layers/geonode%3Acerrados_bd1_v5b) (EMBRAPA, 2020).

O mapa de uso e ocupação do solo, do ano de 2018, com resolução de 30 metros, no formato *geotiff*, foi adquirido do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomas) (https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/brasil/collection-7/lcl/coverage/brasil_coverage_2018.tif) (SOUZA et al., 2020) (Figura 2 d).

Os parâmetros físicos-hídricos utilizados para cada tipo de solo no modelo SWAT foram baseados nos trabalhos de Almeida, (2019); Pereira et al., (2016); Gomes et al., (2020). Esses

parâmetros são: número de camadas do solo (N_LAYER), grupo hidrológico (HYDCRP), profundidade máxima do solo (SOL_ZMX), profundidade da camada do solo (SOL_Z), densidade do solo (SOL_BD), armazenamento de água no solo (SOL_AWC), condutividade hidráulica do solo (SOL_K), teor de carbono orgânico do solo (SOL_CBN), argila do solo (CLAY), silte (SILT), areia (SAND), conteúdo de rocha (ROCK) e fator de erodibilidade do solo (USLE_K).

O modelo foi calibrado e validado para a estação fluviométrica de Porto Extrema (código 42690001). Os primeiros cinco anos da série de dados (1983-1987) foram utilizados para o aquecimento do modelo. O período de aquecimento do modelo é utilizado para que, ao iniciar a simulação, as variáveis de estado do modelo estejam livres das influências das condições iniciais.

2.3.3 Resultados e Discussão

2.3.3.1 Projeções do modelo climático

Na Figura 3, apresenta a precipitação mensal a partir dos dados do modelo MIROC6 que foram inseridos no modelo SWAT, considerando o período histórico de 1980 a 2013 e os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, anos 2015 a 2100.

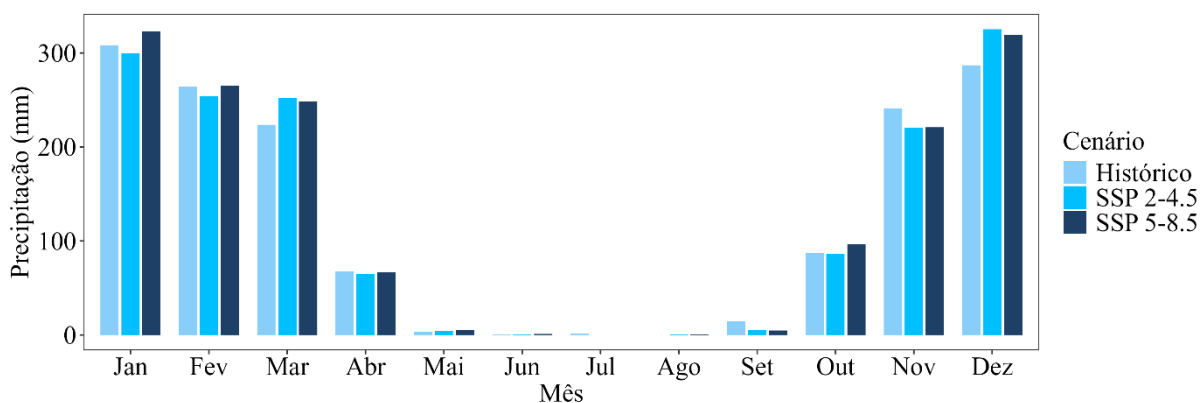


Figura 3. Precipitação simulada do posto fluviométrico Porto Extrema para período histórico e cenários SSP-4.5 e SSP5-8.5.

Ao analisar a distribuição mensal da precipitação em ambos os cenários, observou-se um padrão sazonal, no qual os meses de maio a setembro apresentaram os menores índices de precipitação, enquanto os meses de outubro a abril concentraram os maiores volumes de chuva.

Comparando o cenário histórico (1980 a 2013) com o cenário SSP2-4.5 (2015 a 2100), observa-se que o SSP2-4.5 apresenta maior precipitação em alguns meses chuvosos, como

março (254,13 mm) e dezembro (325,3 mm). No entanto, de forma geral, o período histórico registrou volumes superiores nos meses de janeiro (2,68%), fevereiro (3,79%), abril (3,97%), outubro (0,57%) e novembro (8,30%).

Ao comparar o cenário histórico (1980 a 2013) com o cenário SSP5-8.5 (2015 a 2100), observa-se que o SSP5-8.5 apresentou precipitações maiores nos meses de janeiro (4,8%), fevereiro (0,41%), março (11,16%), outubro (10,67%) e dezembro (11,15%). Apenas no mês de novembro, o período histórico registrou precipitação superior, com 11,15% a mais em relação ao cenário SSP5-8.5.

Em termos comparativos, os dados mostram variações significativas no período de 2015 a 2100 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Nos meses chuvosos, o cenário SSP5-8.5 registrou maior precipitação que o SSP2-4.5 em outubro (+11,29%), dezembro (+1,85%), janeiro (+7,67%), fevereiro (+4,33%) e abril (+3,24%). Em novembro, os dois cenários foram iguais, enquanto em março o SSP2-4.5 superou o SSP5-8.5 em 1,19%.

Nos meses secos, o SSP5-8.5 superou o SSP2-4.5 em maio (5,55 mm) e junho (1,3 mm), enquanto o SSP2-4.5 teve maior precipitação apenas em setembro (5,68 mm). Em julho, ambos apresentaram 0,11 mm.

As projeções de aumento da precipitação anual para a segunda metade do século (2060-2100) observadas nesse estudo, corroboram com os achados de Santos et al. (2024), que também identificaram aumentos na precipitação anual para a região de Diamantina, em Minas Gerais. Esse trabalho utilizou modelos climáticos globais do CMIP6, incluindo especificamente os modelos ACCESS-CM2, MIROC6 e MRI-ESM2-0.

No entanto, é importante ressaltar que, mesmo com o aumento da precipitação em alguns meses, o trabalho de Santos et al. (2024) aponta que a demanda por água da atmosfera será maior devido ao aumento da temperatura do ar e da evapotranspiração nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, o que pode levar a uma redução da disponibilidade hídrica durante os períodos de estiagem e, conseqüentemente, a um aumento de períodos prolongados de seca.

Nas figuras 4, 5 e 6 apresentam-se os mapas que ilustram a distribuição espacial de precipitação mensal a partir dos dados do modelo MIROC6 que foram inseridos no modelo SWAT, considerando o cenário histórico de 1980 a 2013 e os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, de 2015 a 2100.

Medeiros (2024) avaliou vários modelos climáticos, entre eles o modelo MIROC6 CMIP6, e a ocorrência de extremos climáticos de precipitação para o Brasil. Nesse trabalho, o autor observou que as projeções de número de dias secos deverão aumentar em toda a região

do centro-oeste (cerrado), além de mudanças mais pronunciadas sendo esperadas, com chuvas mais intensas e secas severas.

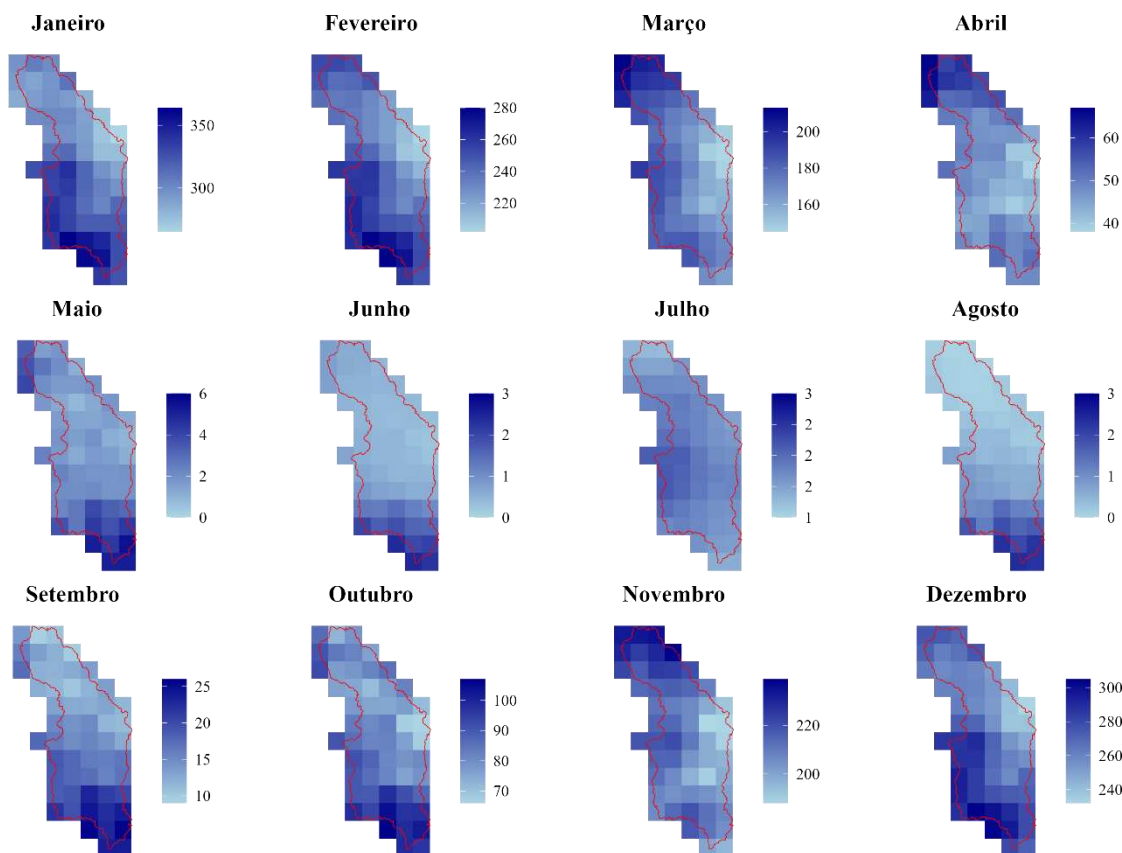


Figura 4. Mapa de precipitação do posto fluviométrico Porto Extrema, para o período histórico (anos 1980 a 2013).

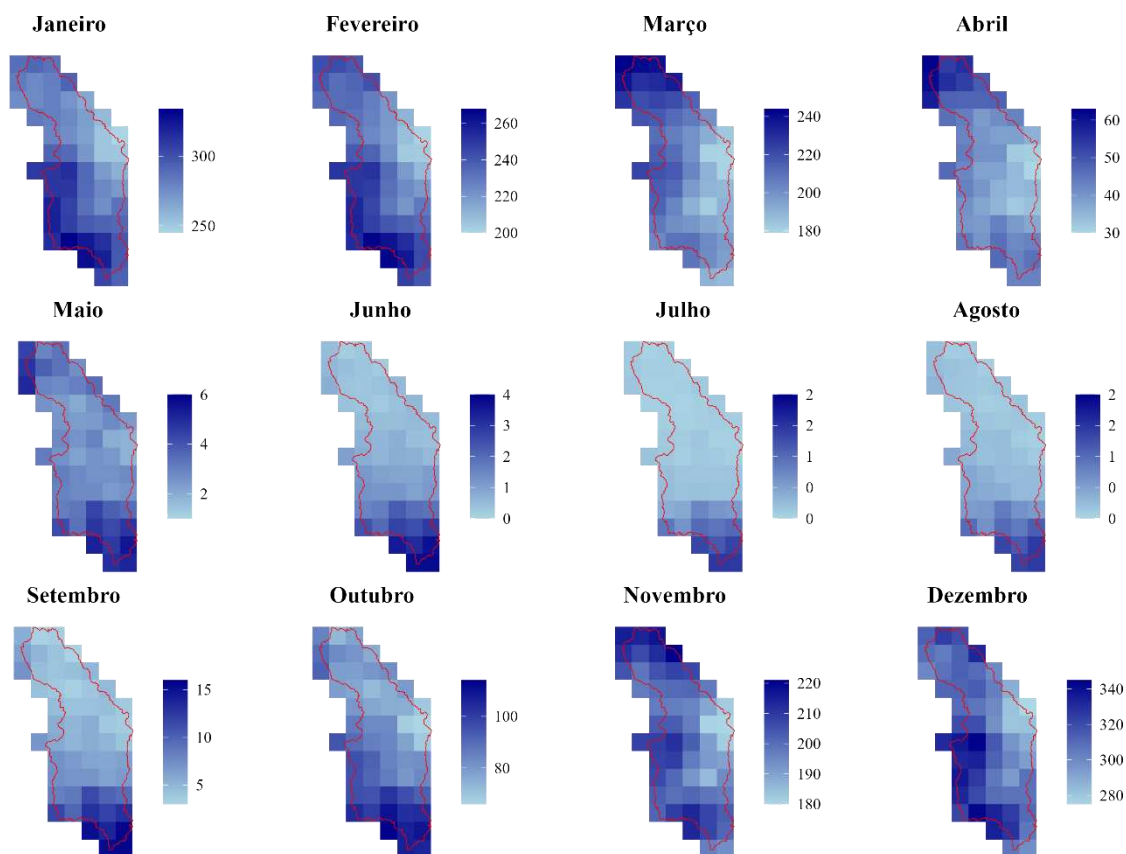


Figura 5. Mapa de precipitação do posto fluviométrico Porto Extrema, para o cenário SSP2-4.5 (anos 2015 a 2100).

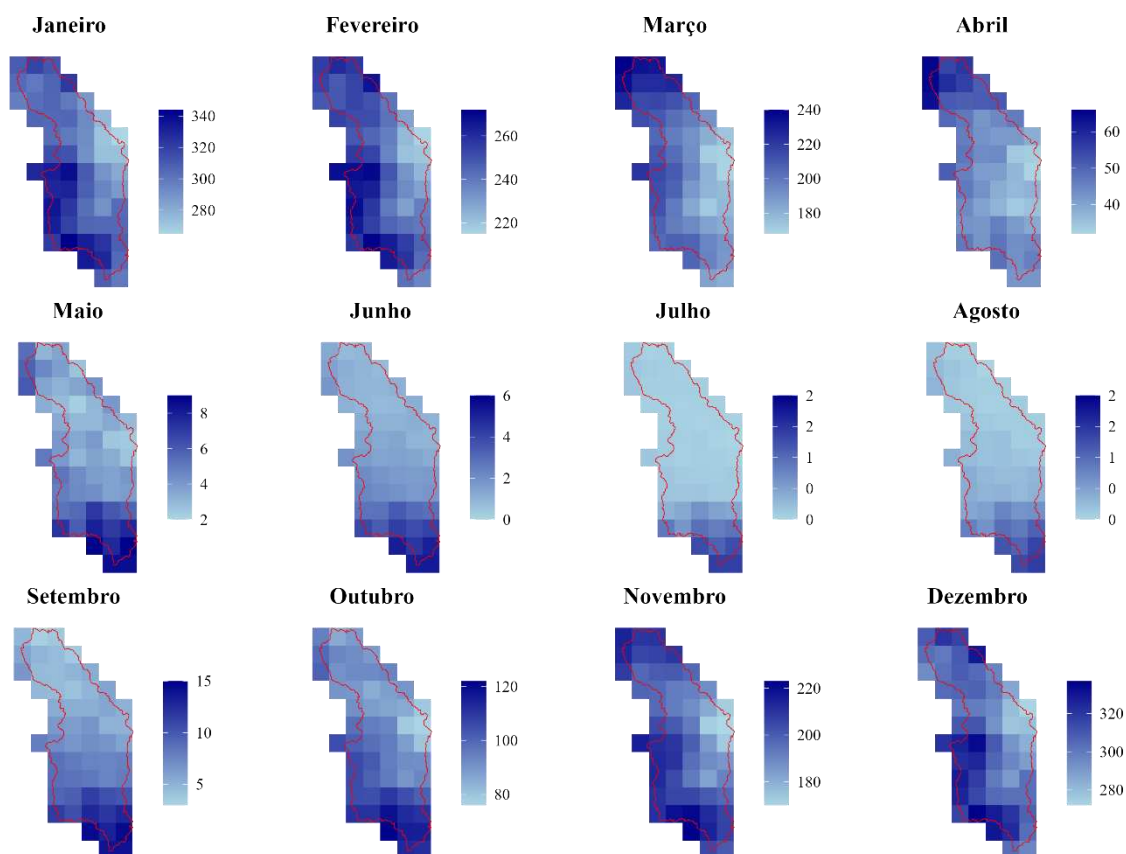


Figura 6. Mapa de precipitação do posto fluviométrico Porto Extrema, para o cenário SSP5-8.5 (anos 2015 a 2100).

A Figura 4 representa o regime pluviométrico do PFPE, que apresenta um período chuvoso concentrado nos meses de outubro a abril, com maiores precipitações nos meses de dezembro e fevereiro especialmente nas porções sudeste e centro da bacia, com valores que podem ultrapassar 300 mm/mês em algumas áreas. No período seco, os meses de junho, julho e agosto registram precipitações mínimas inferiores a 5 mm/mês. A precipitação é espacialmente heterogênea, com algumas regiões apresentando volumes ligeiramente superiores ou inferiores dentro da bacia.

A Figura 5 ilustra a projeção climática do cenário SSP2-4.5, que mantém padrão geral de sazonalidade da precipitação da região com a estação chuvosa e seca distintas. Observa-se a redução de precipitação nos meses de janeiro a março na região centro-sul. Comparando o cenário histórico com o cenário SSP2-4.5, os meses de maior precipitação (dezembro, janeiro, fevereiro) apresentam volumes semelhantes, enquanto os meses de transição, como abril e outubro, apresentam variações em relação ao período histórico.

Os meses mais secos (junho, julho, agosto e setembro) continuam com valores baixos de precipitação. Observa-se a redução na duração do período chuvoso, entretanto a distribuição espacial permanece similar ao cenário histórico, com indícios de maior variabilidade interanual.

Os resultados para o cenário SSP2-4.5, que indicam a intensificação dos períodos secos, são consistentes com o trabalho de Tavares et al. (2023) que, utilizando modelos como o MIROC5, projetaram um aumento do número de dias secos consecutivos e de eventos de seca em algumas regiões do Brasil, incluindo o Cerrado e a bacia do São Francisco, onde o PFPE está inserido. Além disso, Mendonça et al. (2025), utilizando o MIROC6, verificaram que 23% das áreas do bioma Cerrado mostram mudanças na precipitação média anual até o final do século XXI para o cenário SSP2-4.5, o que poderá ocasionar o efeito de secas prolongadas e chuvas intensas.

A figura 6, referente ao cenário SSP5-8.5, apresenta mudanças mais significativas na distribuição da precipitação. Embora a sazonalidade ainda se mantenha, este cenário sugere uma intensificação das chuvas em certas épocas e uma redução em outras, quando comparado ao cenário histórico e ao SSP2-4.5. Nos meses de maiores índices de precipitação dezembro a março, observa-se um aumento nos volumes médios de chuva, com manchas de azul mais escuro indicando precipitações superiores a 300 mm/mês, como pode ser notado nos meses novembro e dezembro.

Por outro lado, nos meses de seca (junho, julho e agosto) há pouca variação em relação ao cenário histórico e cenário SSP2-4.5. Por outro lado, o aumento da intensidade das chuvas em alguns meses que pode resultar em um aumento da variabilidade hidrológica, elevando a probabilidade de eventos extremos mais frequentes, como secas e inundações.

A intensificação das chuvas em alguns meses, projetada pelo cenário SSP5-8.5, corrobora com a análise de Mendonça et al. (2025) que também prevê chuvas intensas para o bioma Cerrado sob este cenário. Esse aumento da intensidade das chuvas pode resultar em um maior volume do escoamento superficial nos meses de maior precipitação, conseqüentemente, um maior risco de inundações, erosão do solo e transporte de sedimentos. Além disso, Medeiros (2024) ao avaliar o modelo MIROC6 no CMIP6, verificou-se que projeções de chuvas mais intensas e secas severas são esperadas para a região do Centro-Oeste (Cerrado).

Avila-Diaz et al. (2020), que utilizaram mais de 20 modelos climáticos, incluindo o MIROC do CMIP5 e 6, também indicaram uma diminuição da precipitação e maior frequência de secas intensas para o Brasil, com tendências negativas nas bacias do Tocantins, Atlântico Norte, São Francisco e Atlântico Central.

Os três cenários climáticos podem indicar que a sazonalidade da precipitação será mantida, mas apontam potenciais mudanças na magnitude e distribuição espacial das chuvas sob cenários de mudanças climáticas.

Em ambos cenários futuros projetados, com destaque para SSP5-8.5, houve aumento da intensidade das chuvas. Este fenômeno pode resultar em um maior volume do escoamento superficial nos meses de maior precipitação, conseqüentemente, um maior risco de inundações, erosão do solo e transporte de sedimentos.

Os períodos secos de junho a agosto permanecem com precipitações muito baixas em todos os cenários, indicando a persistência da estação seca. Desta forma, podendo gerar um agravamento da seca em algumas áreas, combinada com a intensificação das chuvas em outros períodos, podendo levar a um desequilíbrio hídrico, com períodos de escassez seguidos por eventos de cheia.

Essa perspectiva de aumento de temperatura e variações na precipitação, com impactos significativos no balanço hídrico, está alinhada aos achados de Moraes et al. (2023) que previram um aumento de temperatura de 3 a 6 °C no Brasil e uma variação na precipitação de aproximadamente 10 a 6% até 2100, corroborando os resultados apresentados.

O cenário SSP5-8.5 pode exibir um aumento na variabilidade interanual e intra-anual da precipitação, que pode dificultar o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Isso exigirá sistemas de alerta mais eficazes para eventos extremos. Os eventos como secas prolongadas

podem comprometer o abastecimento de água para consumo humano, irrigação e geração de energia, enquanto chuvas intensas podem sobrecarregar a infraestrutura e causar danos.

As mudanças nos padrões de precipitação projetadas pelos cenários climáticos futuros impactarão significativamente a hidrologia local e a gestão de recursos hídricos. Ocasionalmente conflitos pelo uso da água, pelo aumento de secas, alterações no calendário agrícola, exigindo adaptações nas práticas de cultivo. A maior variabilidade climática demandará novas regras para operações de barragens e reservatórios, além de sistemas de previsão e monitoramento em tempo real. Haverá a necessidade de novas infraestruturas de captação e drenagem e maior demanda por irrigação, além de práticas sustentáveis de conservação do solo e água, para garantir a resiliência frente aos cenários futuros.

Na Figura 7, apresenta-se a temperatura máxima mensal a partir dos dados do modelo MIROC6 que foram inseridos no modelo SWAT, considerando o cenário histórico de 1980 a 2013 e os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, de 2015 a 2100.

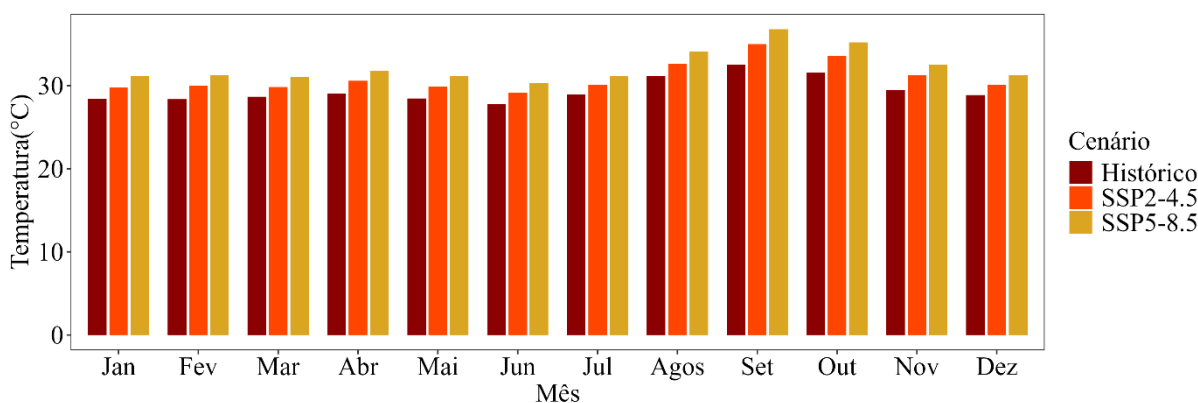


Figura 7. Temperatura máxima do posto fluviométrico Porto Extrema para os cenários Histórico, RPC 4.5 e RPC 8.

A análise da temperatura máxima média mensal na bacia do rio Paracatu, com base nas projeções do modelo MIROC6, indica um aquecimento significativo nos cenários futuros SSP2-4.5 e SSP5-8.5 em comparação ao período histórico. Observa-se um incremento mais acentuado nos meses de setembro e outubro, sugerindo uma intensificação de processos sazonais.

Os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 tendem por temperaturas mais elevadas. Ao comparar os cenários SSP5-8.5 e SSP2-4.5, é notável que o SSP5-8.5 apresenta temperaturas consistentemente mais altas. Os meses com os maiores índices de temperatura para os três cenários (Histórico, SSP2-4.5 e SSP5-8.5) são agosto, setembro e outubro.

Comparando o período histórico com o cenário SSP2-4.5, observa-se um aumento médio de temperatura de aproximadamente 1,5°C. Esse aumento é mais pronunciado nos meses de agosto (com um acréscimo de 1,46°C), setembro (2,47°C) e outubro (2,0°C).

Por sua vez, ao comparar as temperaturas do período histórico com as do cenário SSP5-8.5, verifica-se um aumento médio de cerca de 2,9°C. Os maiores aumentos são registrados em agosto (2,92°C), setembro (4,25°C) e outubro (3,68°C).

Esses resultados corroboram com Avila-Diaz et al. (2020), que, utilizando modelos MIROC do CMIP5 e 6, indicaram que as temperaturas máximas de meados do século (fim do século) excedem 1.4 °C (1.6 °C) nos cenários RCP4.5 e 1.9 °C (3.2 °C) nos cenários RCP8.5.

Tavares et al. (2023), também destacam, para a região hidrográfica do São Francisco, um aumento de temperatura de 1,5°C no cenário RCP4.5 e de 2°C no cenário RCP8.5, o que está em concordância com os aumentos médios observados em nosso estudo para o SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente.

Nas figuras 8, 9 e 10 apresentam-se os mapas que ilustram a distribuição espacial de temperatura máxima a partir dos dados do modelo MIROC6 que foram inseridos no modelo SWAT, considerando o período histórico de 1980 a 2013 e os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, de 2015 a 2100.

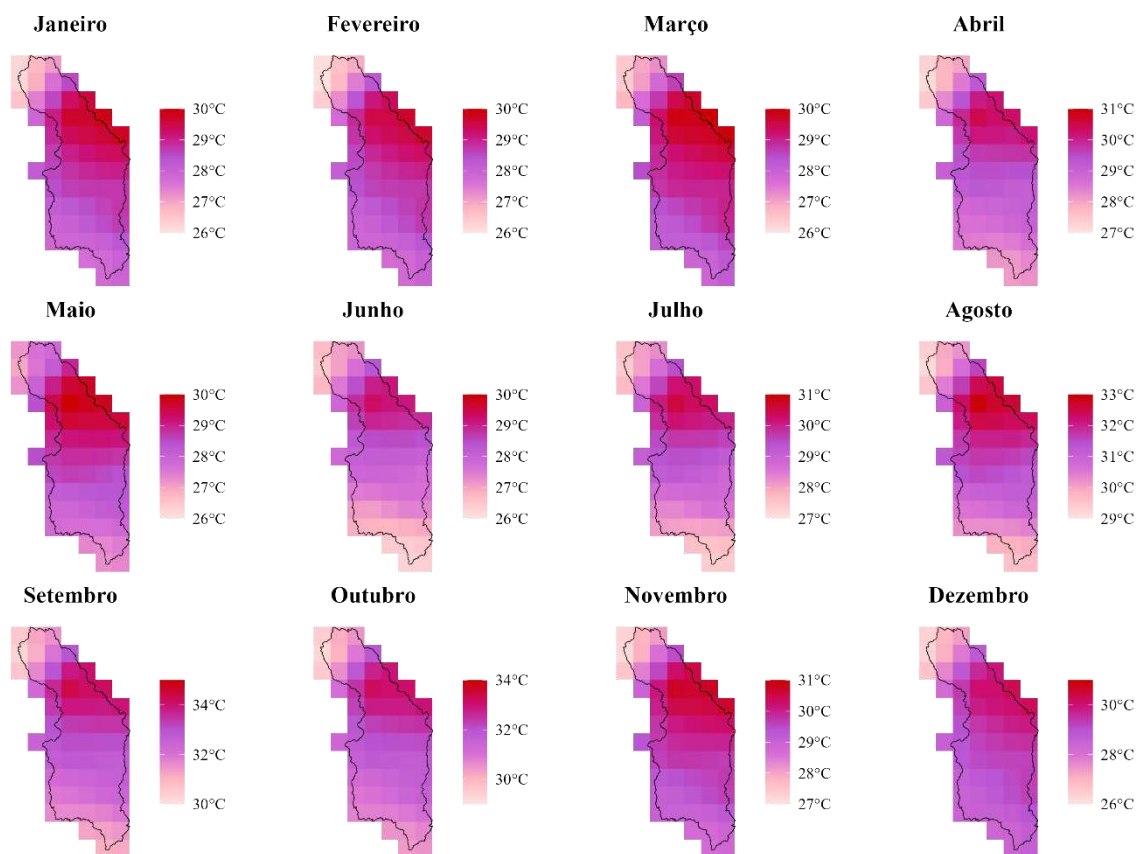


Figura 8. Mapa de temperatura máxima do posto fluviométrico Porto Extrema, para o período histórico (anos 1980 a 2013).

Na figura 8, é possível observar que as temperaturas máximas atingem os picos nos meses de agosto, setembro e outubro; esses picos de temperaturas podem ser observados na região centro-oeste do PFPE, registrando valores de até 34°C no mês de outubro. Nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio, junho e julho apresentam temperaturas máximas mais amenas, a maior parte do terreno possui temperaturas que variam de 26°C a 30°C. Nas regiões noroeste e sudoeste do território, há tendência de menores temperaturas, sendo registradas entre 26 e 27 °C.

Ao realizar uma análise do gradiente latitudinal/longitudinal é possível observar que há um padrão espacial recorrente, em que as temperaturas máximas são consistentemente mais altas nas porções centro-oeste do território mapeado, enquanto as porções noroeste e sul tendem a ser mais frescas. Este gradiente é visível em todos os meses, embora a magnitude das temperaturas varie sazonalmente.

As regiões que possuem maiores temperaturas máximas possuem tons de vermelho intenso e estão localizadas na região centro-oeste e noroeste, correspondendo a áreas

possivelmente mais abertas ou com menor influência de fatores moderadores de temperatura como altitudes mais elevadas ou maior umidade na época de chuvas.

Ao analisar as escalas de cores mostram que a amplitude das temperaturas máximas variam de mês para mês, é notável que em janeiro, a variação é de 26°C a 30°C, enquanto em setembro, é de 30°C a 34°C indicando que não apenas as temperaturas mudam, mas também a dispersão de temperaturas dentro do território.

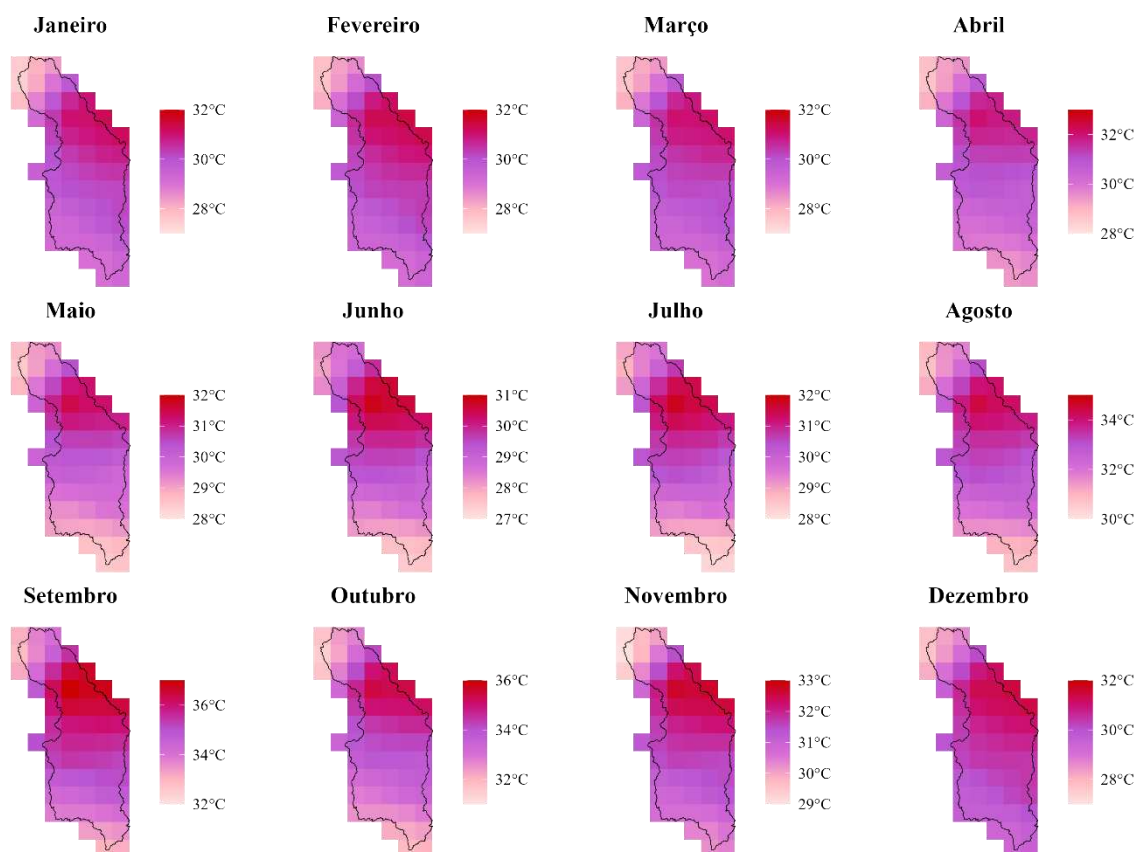


Figura 9. Mapa de temperatura máxima do posto fluviométrico Porto Extrema, para o cenário SSP2-4.5(anos 2015 a 2100).

Na figura 9, apresentam-se os mapas de temperaturas máximas para os meses de janeiro a dezembro. É possível observar que as temperaturas máximas atingem valores ainda mais elevados que no período histórico. Nos meses de setembro e outubro, as temperaturas máximas podem chegar a 36°C, e áreas consideráveis do centro-oeste do território ultrapassam os 34°C.

Nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio, junho e julho, as temperaturas são mais amenas em comparação com os meses mais quentes, quando comparado ao período histórico. As temperaturas nesses meses variam entre 28°C e 32°C.

Nas porções da região norte e noroeste, sul e leste, ocorrem temperaturas mais amenas. Ao comparar o cenário SSP2-4.5 ao período histórico, as áreas com as temperaturas mais elevadas (tons de magenta intenso) parecem ter uma expansão e se tornar mais dominantes em quase todos os meses. Isso acontece até nos meses que possuem temperaturas mais baixa (mais frios exemplo janeiro a julho), a mancha mais avermelhada (indicando temperaturas de 30°C ou mais) ocupa uma proporção maior do território.

Analisando os meses de janeiro a maio, a escala inferior passa de 26°C (histórico) para 28°C (SSP2-4.5), e a superior de 30°C para 32°C. Para os meses de junho e julho, a escala inferior passa de 27°C (histórico) para 28°C (SSP2-4.5). Nos meses de agosto a outubro, as escalas no SSP2-4.5 chegam a 34°C e 36°C, enquanto no histórico, o máximo era 34°C. Por fim os meses novembro e dezembro, as escalas também indicam temperaturas mais elevadas em SSP2-4.5.

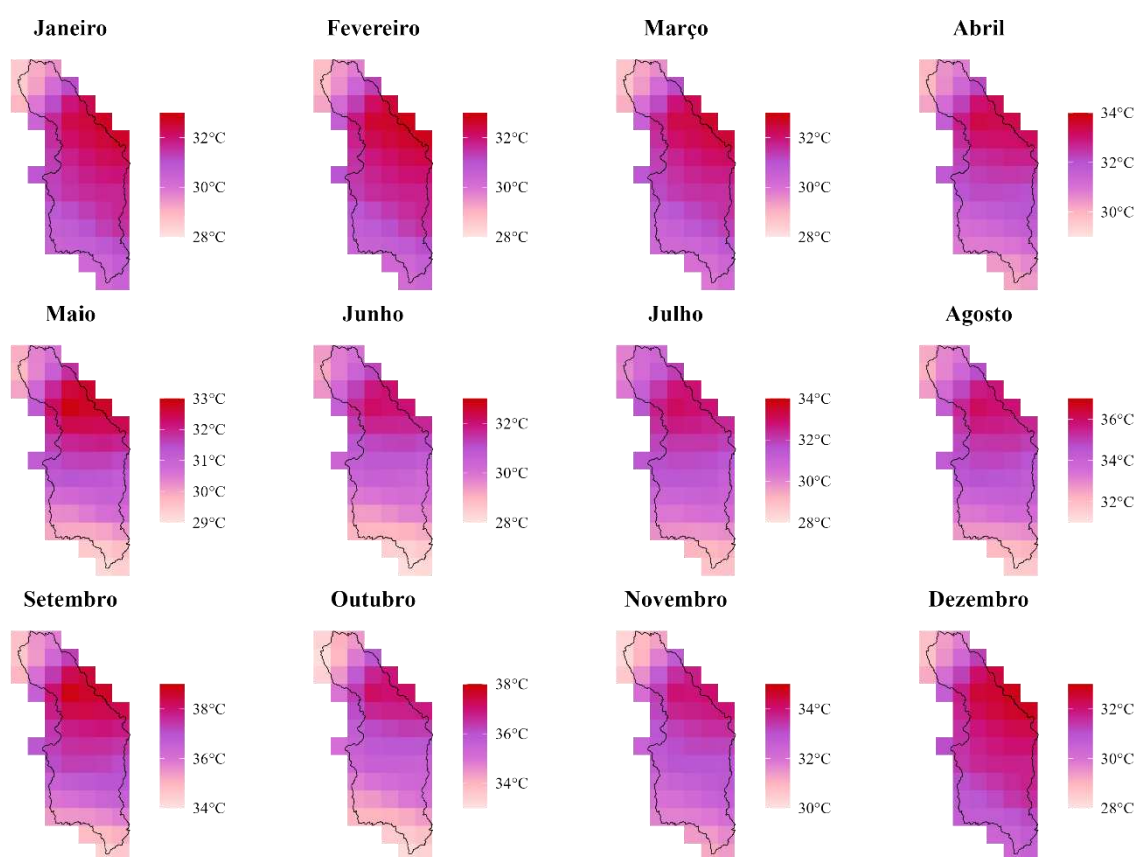


Figura 10. Mapa de temperatura máxima do posto fluviométrico Porto Extrema, para o cenário SSP5-8.5(anos 2015 a 2100).

Na figura 10, apresentam-se os mapas de temperaturas máximas para os meses de janeiro a dezembro. É possível observar que a sazonalidade nos cenários anteriores (período

histórico e SSP2-4.5) é mantida. As temperaturas máximas atingem valores ainda mais elevados que no período histórico.

Os meses de agosto, setembro e outubro continuam a ser os mais quentes, no entanto, neste cenário, as temperaturas máximas atingem valores alarmantemente altos. Em setembro e outubro, a escala de cores mostra que as temperaturas podem chegar a 38°C, com grande parte do território norte e central ultrapassando 36°C. Em agosto, as temperaturas também são elevadas, com várias áreas acima de 34°C.

Enquanto nos meses menos quentes, os meses que geralmente possuem temperaturas mais amenas, quando comparados ao período histórico (janeiro, fevereiro, março, abril, junho, julho e dezembro), mostram temperaturas mais altas. Nestes meses, as temperaturas aparecem em tons roxos marcando 28°C e sobem para 30°C. Nos meses de maio e novembro também indicam um aumento substancial, com máximas atingindo 33°C e 34°C, respectivamente.

Avaliando o gradiente espacial já possível observar o padrão de temperaturas mais altas no norte e noroeste e mais amenas no sul e leste ainda é discernível, mas a diferença se torna menos acentuada devido ao aquecimento generalizado em todas as regiões.

As áreas com as temperaturas mais elevadas (tons de rosa e vermelho) se expandem territorialmente em quase todos os meses. Isto pode ser observado nas regiões sul e leste, que eram relativamente mais frescas no período histórico e no SSP2-4.5, agora apresentam temperaturas máximas que eram típicas das regiões mais quentes em cenários menos severos.

Ao realizar a comparação das escalas de cores com os cenários anteriores é crucial observar que as temperaturas máximas em SSP5-8.5 são mais altas em todos os meses do ano. A escala inferior para muitos meses começa em 28°C ou 29°C, que já eram os valores máximos em algumas partes do território histórico, mas nos meses de setembro e outubro é registrado temperaturas de 36°C e 38°C, indicando um aquecimento extremo em comparação com o período histórico e mesmo o cenário SSP2-4.5.

O cenário SSP5-8.5 demonstra um aumento drástico e generalizado das temperaturas máximas, os valores máximos observados no período histórico são frequentemente os valores mínimos ou intermediários no SSP5-8.5. A extensão das áreas com temperaturas acima de 30°C é grande e constante ao longo do ano.

Comparando o cenário SSP5-8.5 em relação ao cenário SSP2-4.5, embora o SSP2-4.5 já mostrasse um aquecimento significativo, o SSP5-8.5 representa uma intensificação ainda maior. As temperaturas mais extremas (36°C, 38°C) são exclusivas deste cenário, indicando um aquecimento acelerado e mais severo. Os meses de inverno do SSP5-8.5 se assemelha ou até supera a meses de verão do SSP2-4.5 em termos de patamar térmico.

Na Figura 11, apresenta a temperatura mínima mensal a partir dos dados do modelo MIROC6 que foram inseridos no modelo SWAT, considerando o cenário histórico de 1980 a 2013 e os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, de 2015 a 2100.

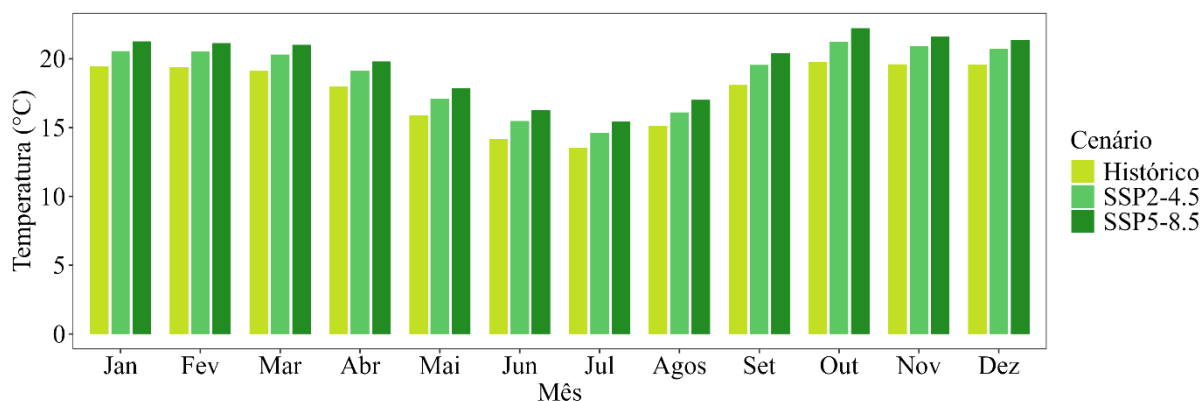


Figura 11. Temperatura mínima do posto fluviométrico Porto Extrema, para os cenários Histórico, SSP2-4.5 e SSP-58.5.

A análise da temperatura mínima mensal na bacia do rio Paracatu, com base nas projeções do modelo MIROC6, revela que o padrão sazonal é mantido nos três cenários avaliados, além de indicar um aumento das temperaturas mínimas em todos os meses, quando se compara o período histórico com os cenários futuros SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

Nos meses da primavera, ao comparar o período histórico com o cenário SSP2-4.5, observa-se um aumento médio de temperatura de aproximadamente 1,2 °C, com destaque para os meses de setembro (1,5 °C), outubro (1,5 °C) e novembro (1,3 °C). Por sua vez, ao comparar as temperaturas do período histórico com o cenário SSP5-8.5, verifica-se um aumento médio mais acentuado, de cerca de 2 °C, com os maiores incrementos também ocorrendo em setembro (2,3 °C), outubro (2,4 °C) e novembro (2,0 °C).

Durante o inverno (junho, julho e agosto), os meses continuam apresentando as menores temperaturas mínimas do ano, independentemente do cenário considerado. No período histórico, os valores médios são de 14,1 °C em junho, 13,5 °C em julho e 15,1 °C em agosto. Já nos cenários futuros, observam-se aumentos significativos em relação a esses valores. Em junho, por exemplo, a temperatura mínima média sobe para 15,47 °C no SSP2-4.5 e para 16,2 °C no SSP5-8.5. Em julho, passa de 13,5 °C no período histórico para 14,6 °C no SSP2-4.5 e 15,4 °C no SSP5-8.5. No mês de agosto, observa-se elevação de 15,1 °C para 16,1 °C e 17,0 °C, respectivamente, nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

Nas figuras 12, 13 e 14 apresentam-se os mapas que ilustram a distribuição espacial de temperatura mínima a partir dos dados do modelo MIROC6 que foram inseridos no modelo SWAT, considerando o período histórico de 1980 a 2013 e os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, de 2015 a 2100.

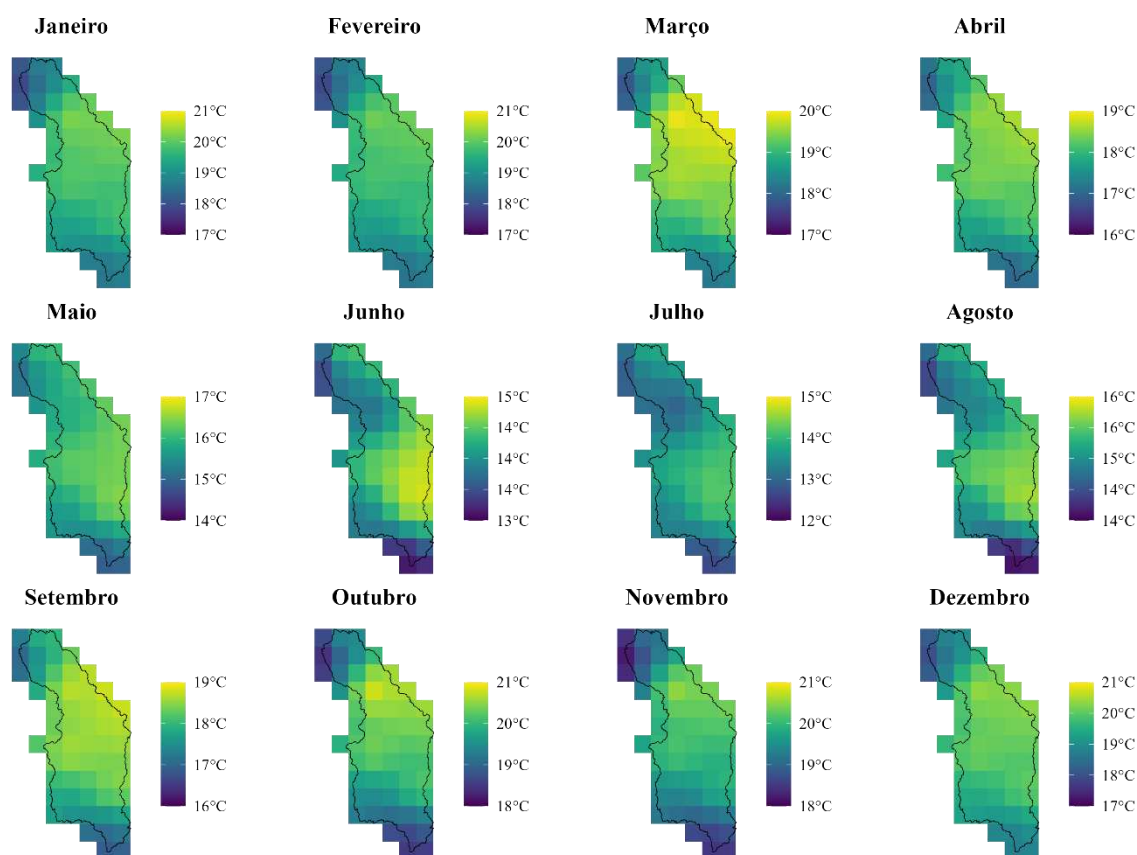


Figura 12. Mapa de temperatura mínima do posto fluviométrico Porto Extrema, para o período histórico (anos 1980 a 2013).

Na figura 12, os meses de janeiro, fevereiro e março, a temperatura inicia em 17°C e avança até 21°C. Já nos meses de abril e setembro a temperatura inicia em 16°C e chega até 19°C. Julho é o mês com menor registro de temperatura atingindo 12°C chegando até 15°C. Nos meses de agosto e maio também apresentam temperaturas mais amenas, registrando 14°C variando até 17°C e 16°C respectivamente. Em junho a temperatura varia 13°C a 15°C.

Os meses mais quentes são os meses de outubro e novembro registram 18°C chegando a 21°C, as maiores temperaturas são registradas na porção centro-oeste da bacia PFPE, com tons de amarelo. O mês dezembro a temperatura varia de 17° a 21°C.

Ao realizar uma análise do gradiente espacial térmico é possível observar que há um padrão espacial recorrente, onde as áreas mais frias estão na região sul e oeste com tons da cor

verde escuro, enquanto as áreas mais quentes localizam-se na região centro-oeste, com tons amarelados.

As regiões que possuem maiores temperaturas possuem tons amarelado e estão localizadas na região centro-oeste, correspondendo a áreas possivelmente mais abertas ou com menor influência de fatores moderadores de temperatura como altitudes mais elevadas ou maior umidade na época de chuvas.

Na figura 13, são apresentados os mapas de temperatura mínima para todos os meses do ano para o cenário SSP2-4.5.

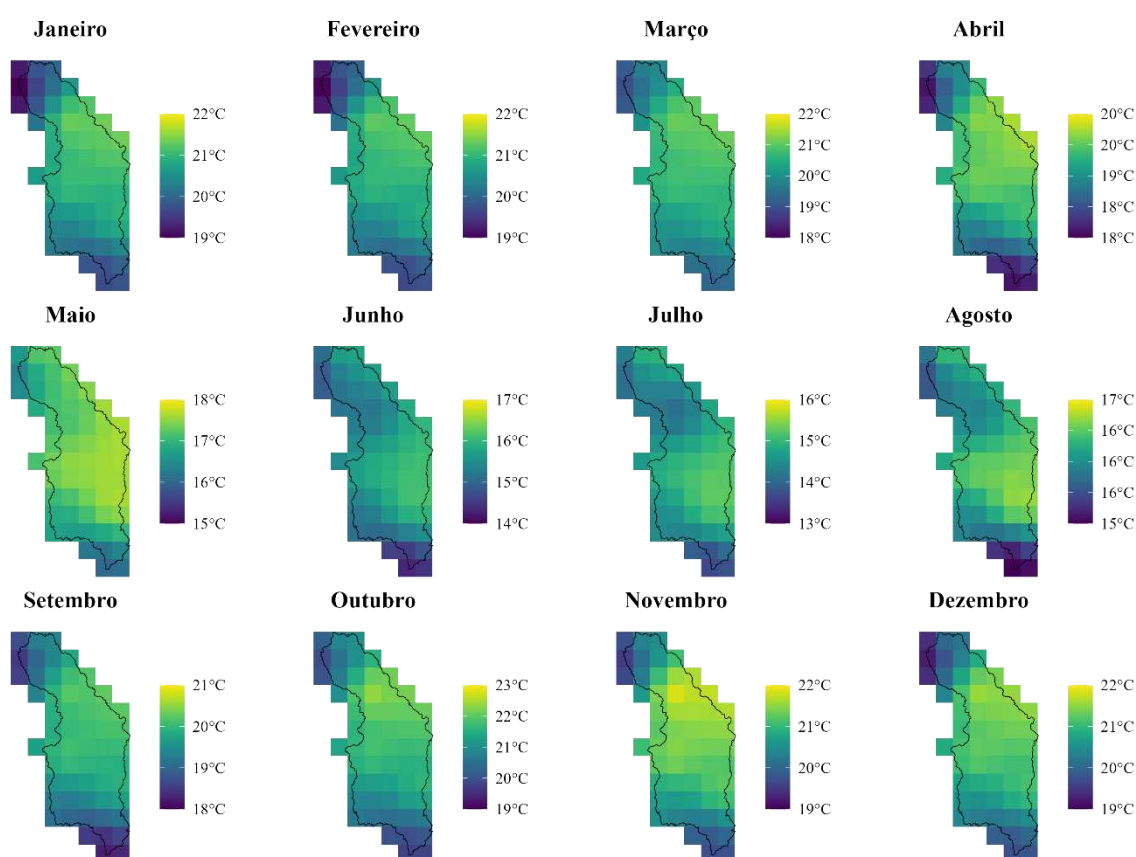


Figura 13. Mapa de temperatura mínima do posto fluviométrico Porto Extrema, para o cenário de SSP2-4.5 (anos 2015 a 2100).

Na figura 13 demonstra que as temperaturas mínimas projetadas no cenário SSP2-4.5 são consistentemente mais elevadas do que as observadas no período histórico em todos os meses, conforme ilustrado nas figuras.

Nos meses de janeiro, fevereiro e março, as temperaturas no cenário SSP2-4.5 variam de 19°C a 22°C, enquanto no período histórico a variação é de 17°C a 21°C. Em abril, as

temperaturas no SSP2-4.5 situam-se entre 18°C e 20°C, contrastando com 16°C a 19°C no histórico.

Para maio, o cenário SSP2-4.5 apresenta temperaturas de 15°C a 18°C, comparado a 14°C a 17°C no histórico. Em junho, a variação no SSP2-4.5 é de 14°C a 17°C, enquanto no histórico é de 13°C a 15°C. Julho, o mês mais frio, registra temperaturas de 13°C a 16°C no SSP2-4.5 e de 12°C a 15°C no histórico, indicando um aquecimento mesmo neste período. Em agosto, o SSP2-4.5 apresenta temperaturas de 15°C a 17°C, em comparação com 14°C a 16°C no histórico.

Em setembro, as temperaturas no SSP2-4.5 variam de 18°C a 21°C, significativamente mais altas que os 16°C a 19°C do período histórico. Outubro demonstra um aquecimento notável, com variações de 19°C a 23°C no SSP2-4.5, contra 18°C a 21°C no histórico.

Nos meses de novembro e dezembro, as temperaturas mínimas no SSP2-4.5 são superiores, com um intervalo de 19°C a 22°C, enquanto no histórico o intervalo varia de 17°C/18°C a 21°C.

A análise espacial do gradiente térmico revela que as regiões sul e leste da bacia do PFPE apresentam as menores temperaturas, enquanto o norte e noroeste concentram os maiores valores. Observa-se também a expansão das áreas mais quentes — representadas por tons de amarelo e verde-claro — ocupando uma porção significativamente maior do território em todos os meses, quando comparadas ao cenário histórico.

Na figura 14, são apresentados os mapas de temperatura mínima para todos os meses do ano para o cenário SSP5-8.5.

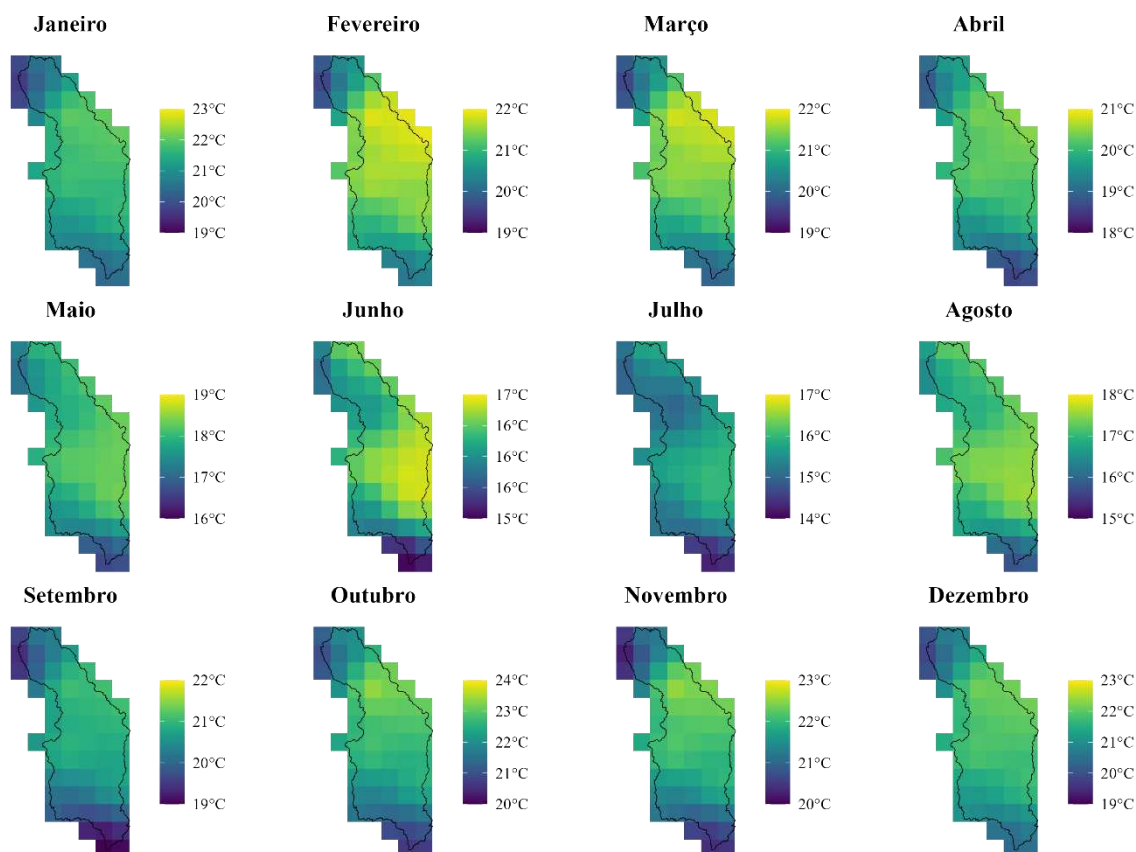


Figura 14. Mapa de temperatura mínima do posto fluviométrico Porto Extrema, para o cenário de SSP5-8.5 (2015-2100).

A Figura 14 evidencia que as temperaturas mínimas projetadas no cenário SSP5-8.5 são consistentemente superiores às do período histórico e cenário SSP2-4.5, em todos os meses, e também mais elevadas que as do cenário SSP2-4.5.

Nos meses de janeiro, fevereiro e março, as temperaturas mínimas no cenário SSP5-8.5 variam de 19°C a 23°C, em contraste com 17°C a 21°C no período histórico. Em abril, a variação é de 18°C a 21°C para o SSP5-8.5, enquanto no histórico é de 16°C a 19°C. Em maio, as temperaturas oscilam entre 16°C e 19°C no SSP5-8.5 e entre 14°C e 17°C no período histórico.

Julho apresenta as menores temperaturas em ambos os períodos, com 14°C a 17°C no SSP5-8.5 e 12°C a 15°C no histórico. Em junho e agosto, as temperaturas no SSP5-8.5 iniciam em 15°C, atingindo 17°C e 18°C, respectivamente. No período histórico, junho registra 13°C a 15°C e agosto, 14°C a 16°C.

Para setembro e dezembro, as temperaturas no cenário SSP5-8.5 iniciam em 19°C, alcançando 22°C e 23°C, respectivamente, enquanto no histórico iniciam em 16°C e 17°C,

atingindo 19°C e 21°C. Já em outubro e novembro, as temperaturas no SSP5-8.5 iniciam em 20°C, chegando a 24°C e 23°C, respectivamente, comparado a 18°C a 21°C no período histórico.

A análise espacial do gradiente térmico indica que as regiões sul e leste da bacia do PFPE apresentam as menores temperaturas mensais, enquanto o centro-oeste concentra os maiores valores. Observa-se ainda uma ampliação significativa das áreas mais quentes em comparação ao histórico, destacadas pelos tons de amarelo e verde-claro que ocupam uma parcela crescente do território ao longo do ano.

Mendonça et al. (2025), utilizando o modelo MIROC6, projetaram para o cenário SSP2-4.5 um aumento na temperatura média global de 2,7°C até 2100, enquanto para o SSP5-8.5, um aumento de 4,4°C até o final do século.

De forma similar, Moraes et al. (2023), que utilizaram o MIROC6 em conjunto com outros modelos do CMIP6 para identificar áreas suscetíveis à desertificação, verificaram que as projeções indicam que a temperatura do Brasil pode aumentar entre 3°C a 6°C até 2100. Esses estudos reforçam a projeção de aquecimento significativo na região. As contínuas mudanças nas temperaturas máximas e mínimas continuarão a comprometer as principais áreas de produção agrícola no Brasil, conforme sugerido por Avila-Diaz et al. (2020)

2.3.3.2 Mudanças na vazão mensal

A Figura 15 apresenta a vazão mensal gerada pelo modelo SWAT com dados do MIROC6, considerando o período histórico (1980–2013) e os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (2015–2100). A distribuição mensal da vazão em ambos os cenários revela um padrão sazonal, com menores vazões entre maio e setembro e os maiores volumes concentrados de outubro a abril.

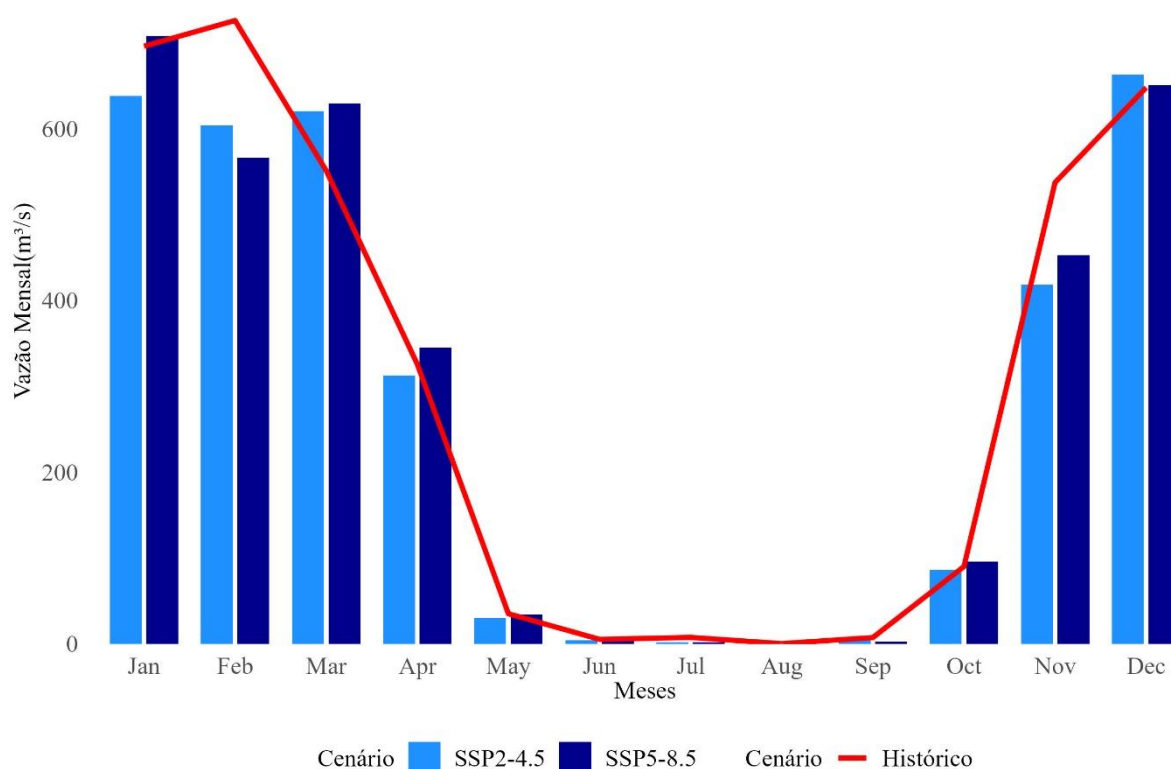


Figura 15. Vazão mensal para o cenário histórico, SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

No cenário SSP2-4.5, observa-se redução generalizada das vazões em relação ao histórico, nos meses de janeiro (696,13 para 639,17 m³/s), fevereiro (726,08 para 604,17 m³/s), abril (325,90 para 312,90 m³/s), maio (35,19 para 30,70 m³/s), junho (5,39 para 4,45 m³/s), julho (7,62 para 2,00 m³/s), agosto (0,41 para 0,35 m³/s), setembro (7,44 para 7,36 m³/s), outubro (90,20 para 86,40 m³/s) e novembro (537,40 para 418,40 m³/s). As exceções ocorrem em março, com aumento de 551,27 para 620,60 m³/s, e em dezembro, de 647,97 para 663,10 m³/s.

No cenário SSP5-8.5, de maior emissão, o comportamento é mais heterogêneo. Alguns meses apresentam aumento de vazão, como janeiro (708,33 m³/s), abril (345,04 m³/s) e dezembro (650,80 m³/s), superando os valores históricos de 696,13, 325,86 e 647,93 m³/s, respectivamente. No entanto, de maio a setembro, ocorrem quedas acentuadas: maio (35,19 para 34,68 m³/s), junho (5,39 para 5,06 m³/s), julho (7,62 para 2,20 m³/s), agosto (0,41 para 0,18 m³/s) e setembro (7,44 para 2,79 m³/s).

Esses resultados indicam maior variabilidade e ocorrência de extremos hidrológicos no cenário SSP5-8.5, com cheias mais intensas e secas mais severas, o que pode comprometer a eficácia dos sistemas de gestão de recursos hídricos e da agricultura irrigada.

Os resultados obtidos na avaliação da oferta hídrica da região estudada com o MCR MIROC6 estão em consonância com os estudos de Althoff et al., (2020) e Cambraia Neto et al., (2021), que investigaram os impactos das mudanças climáticas na região da bacia do rio Paracatu. Esses estudos utilizaram o modelo MIROC5 e demonstraram que, quanto mais próximo do final do século 2100, há uma tendência de redução na disponibilidade hídrica, podendo estar associado a mudanças no regime de precipitação e aumento das temperaturas médias.

Althoff et al. (2020) identificaram que, em cenários de aquecimento global intensos (RCP 8.5), a evaporação aumenta e as alterações nos padrões de precipitação prejudicam diretamente a oferta hídrica, particularmente em áreas de Cerrado. Da mesma forma, Cambraia Neto et al. (2021) destacaram que a região de estudo sofrerá com a redução do escoamento superficial e com o aumento da frequência de eventos extremos, como secas prolongadas e precipitações intensas, havendo a necessidade de uma melhor gestão dos recursos hídricos.

Na Figura 16, é exibido o gráfico da curva de permanência da vazão simulada resultante do modelo MIROC6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e dos dados observados.

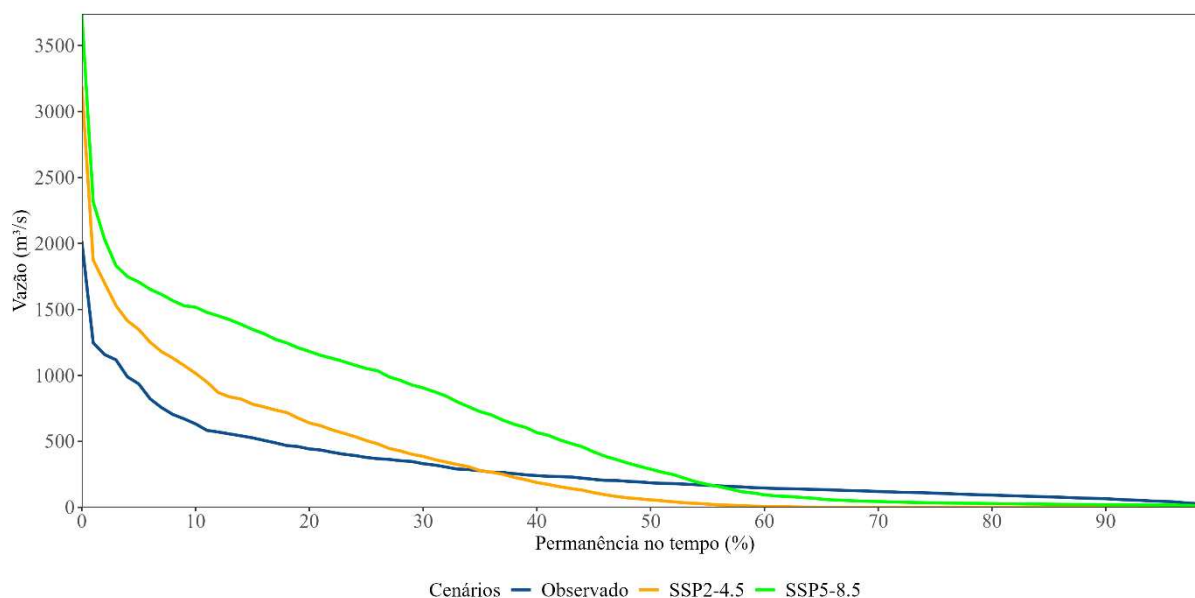


Figura 16. Curva de permanência da vazão simulada para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e dados observados de vazão.

Ao avaliar o cenário SSP2-4.5, a curva de permanência indica que há um período significativo, entre 99% e 66% do tempo, em que a vazão atinge valores nulos (0 m³/s). Esse resultado sugere a ocorrência de eventos extremos de seca que serão prolongados no futuro. A

partir de 66% do tempo, este cenário apresenta vazão (0,5 m³/s), enquanto os dados observados apresentam vazão de 135 m³/s.

Apesar de o cenário SSP2-4.5 apresentar vazões nulas, foi observado um aumento médio de 10,4% em comparação aos dados observados; isso pode ser explicado porque as vazões de menor permanência no tempo apresentam valores mais altos do que os dados observados.

Por outro lado, a análise da curva de permanência para o cenário SSP5-8.5 revela uma situação menos crítica em termos de vazões mínimas, onde não apresentam valores nulos de vazão entre 99% e 66% do tempo, que variam de 12,9 m³/s a 56,3 m³/s. A Q95 desse cenário é de 17,2 m³/s. e a Q90 é de 20,3 m³/s., valores cerca de 31% e 62,7% respectivamente abaixo quando comparados aos dados observados que possuem valores de 18,7 m³/s e 46,1 m³/s respectivamente. Apesar de não apresentar valores nulos de vazão, os dados de vazão da curva de permanência do SSP5-8.5 apresentam um aumento médio de 49,3% em comparação aos dados observados, isso porque as vazões de menor permanência do tempo apresentam valores altos. Isso mostra que a bacia do PFPE poderá sofrer com eventos extremos de seca e chuva no futuro.

Comparando os dados da Q95 e Q90 dos dois cenários futuros SSP2-4.5 e SSP5-8.5, observa-se que o cenário SSP2-4.5 atinge uma vazão de 0 m³/s para Q95 e Q90 enquanto o cenário SSP5-8.5 atinge vazões de 12,9 m³/s e 17,2 m³/s respectivamente. Isso indica que o cenário SSP2-4.5 terá secas mais extremas que o cenário SSP5-8.5.

Esses valores sugerem que com o aumento das temperaturas e das mudanças no padrão de precipitação previstos nos dois cenários, a bacia terá capacidade de sustentar uma oferta hídrica considerável em grande parte do tempo.

A partir dos dados da curva de permanência (Figura 17) foi realizado o teste estatístico de Mann-Whitney. Essa análise estatística comparou as vazões observadas com as vazões simuladas pelo modelo climático MIROC6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Este teste avaliou diferença absoluta entre as distribuições acumuladas das séries de vazão observada e simulada, gerando os indicadores; (*w*) o valor da estatística que representa a magnitude da discrepância, e o (*p_valor*) que quantifica a significância estatística dessa diferença.

Ao verificar o resultado do *p_valor* para o cenário SSP2-4.5, foi encontrado um valor de 0,03994, que ficou abaixo de 0,05. Este resultado indica que as vazões simuladas pelo produto MIROC6 cenário SSP2-4.5 não foi estatisticamente equivalente às vazões observadas, ou seja, havendo diferença estatística entre os dados. Dessa forma, as distribuições acumuladas dos dados observados e simulados são relevantes e comprometem a equivalência entre as séries.

Ao verificar o resultado do p_valor para o cenário SSP5-8.5, foi encontrado um valor de 0,514746, valor que ficou acima de 0,05. Este resultado indica que as vazões simuladas pelo produto MIROC6 cenário SSP5-8.5 são estatisticamente equivalentes às vazões observadas, ou seja, não há diferença estatística entre os dados. Esse resultado determina que o cenário SSP5-8.5 está próximo das vazões observadas na PFPE, destacando seu potencial para aplicações em estudos hidrológicos e no planejamento de recursos hídricos.

Na Figura 17 são apresentados dois gráficos de dispersão da vazão mensal simulada para os cenários do modelo climático MIROC6.

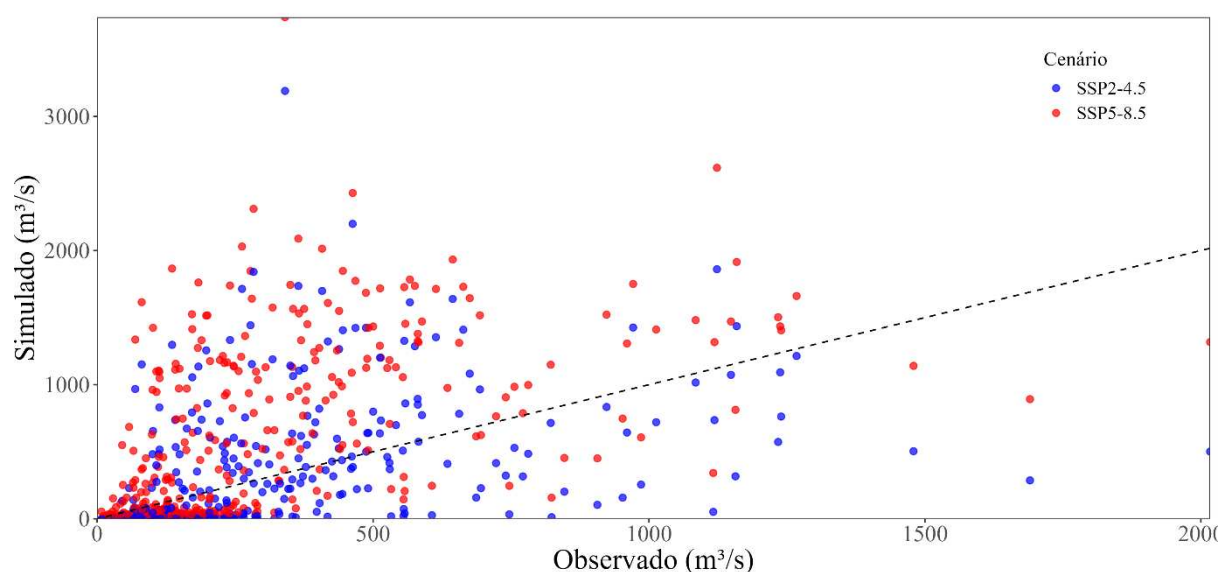


Figura 17. Comparação entre a disponibilidade hídrica mensal observada e simulada no PFPE. A disponibilidade hídrica foi simulada com o modelo SWAT utilizando dados do MIROC6 cenário SSP2-4.5 e cenário SSP5-8.5.

A Figura 17 apresenta os resultados da disponibilidade hídrica simulada com o modelo SWAT, utilizando dados do modelo climático MIROC6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. A figura evidencia as limitações na capacidade do modelo de reproduzir adequadamente a variabilidade da disponibilidade hídrica observada na bacia.

O cenário SSP2-4.5 obteve um coeficiente de determinação (R^2) de 0,19, enquanto o SSP5-8.5 atingiu um coeficiente de 0,27. Ambos os valores indicam uma baixa correlação entre os dados simulados e observados. Embora o cenário SSP5-8.5 tenha apresentado um ajuste superior, os dois valores estão abaixo do ideal para aplicações com boa performance. Isso mostra que o modelo tem dificuldades em simular picos de vazões e variações mais extremas em relação aos dados observados.

Na figura, é possível observar uma grande dispersão dos pontos em ambos os cenários. É notável que os pontos em vermelho (SSP5-8.5) parecem um pouco mais agrupados e alinhados com a linha de tendência, o que corrobora que o R^2 que é superior, em comparação com os pontos azuis (SSP2-4.5).

Analisando as vazões observadas de menores proporções (entre 0 a 500 m³/s), o modelo parece ter uma performance muito inconsistente, pois os pontos simulados variam com valores muito baixos e acima de 1000 m³/s, sendo isso mais notável no cenário SSP2-4.5 (pontos azuis).

Nas vazões observadas mais altas, no entanto, o modelo tende a subestimar. A maioria dos pontos está abaixo da linha tracejada, especialmente para vazões observadas acima de 1000 m³/s, sugerindo que o modelo tem dificuldade em simular eventos de cheia ou picos de vazão.

O cenário SSP5-8.5 ($R^2=0,27$) foi o que apresentou melhor performance. Isso pode estar associado à maior frequência e intensidade de eventos extremos simulados nesse cenário, que se aproximam mais dos extremos observados historicamente.

2.3.4. Conclusões

Os cenários futuros (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) não indicaram alteração na sazonalidade do clima na região, com períodos secos entre maio e setembro e períodos chuvosos concentrados entre outubro e abril. No entanto, observa-se uma intensificação das chuvas nos meses úmidos e uma redução ainda mais acentuada das precipitações nos meses secos, especialmente no cenário SSP5-8.5, com um aumento médio de 3,4% na precipitação, enquanto o cenário SSP2-4.5 indicou um aumento de apenas 1,1%.

Em relação a temperatura, ambos os cenários indicam elevações nas temperaturas máximas e mínimas, com destaque para os meses de agosto a outubro. O cenário SSP5-8.5 registrou os incrementos mais drásticos, com aumento de 3°C, com temperaturas máximas atingindo 38°C, o que pode intensificar eventos extremos, como ondas de calor. As temperaturas mínimas, por sua vez, apresentaram um aumento de aproximadamente 2°C.

Quanto a vazão, o cenário SSP2-4.5 mostrou reduções, com a ocorrência de períodos prolongados de vazão nula, indicando secas extremas, enquanto o cenário SSP5-8.5 apresentou maior variabilidade, com aumentos em alguns meses chuvosos e reduções acentuadas nos meses secos, sugerindo maior ocorrência de eventos extremos (cheias e secas). Na análise estatística de Mann-Whitney indicou que o cenário SSP5-8.5 apresentou maior aderência aos dados observados, enquanto o SSP2-4.5 apresentou discrepâncias estatisticamente significativas.

Apesar das diferenças entre os dois cenários, ambos apresentaram uma tendência de redução da vazão em comparação ao cenário histórico. O cenário SSP2-4.5 apresentou uma redução de aproximadamente 7,15%, enquanto o cenário SSP5-8.5 indicou uma diminuição de 3,8%. Esses resultados sugerem que até o final do século XXI, a vazão do posto fluviométrico Porto Extrema poderá enfrentar uma redução na disponibilidade hídrica, exigindo estratégias de adaptação e gestão mais eficazes para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos frente às mudanças climáticas projetadas.

3. Conclusões gerais

O desempenho do modelo hidrológico SWAT na calibração e validação foi satisfatório, com valores de NSE superiores ao mínimo recomendado (0,69 e 0,82, respectivamente), indicando que o modelo é apropriado para representar os processos hidrológicos da bacia. A análise da sensibilidade dos parâmetros ressaltou a importância de fatores como SOL_K, GW_REVAP, CN2 e ESCO na simulação da infiltração, evaporação e escoamento superficial.

A avaliação dos produtos de precipitação indicou que a escolha da base de dados influencia significativamente a acurácia das simulações hidrológicas. O produto GPCC 7.0 destacou-se como o mais adequado para a bacia do PFPE, seguido pelo ERA5 e CHIRPS v2.0, de acordo com as métricas estatísticas como NSE, KGE, PBIAS e R². Esses resultados demonstram que há a necessidade de uma seleção criteriosa das fontes de dados de precipitação, que deverá considerar além da resolução espacial, a representatividade regional e a capacidade de captar a variabilidade hidrológica local estudado.

As projeções climáticas futuras, com base no modelo MIROC6, indicaram mudanças nos padrões de precipitação, temperatura e vazão para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Ambos os cenários indicaram a manutenção da sazonalidade típica da região, mas com intensificação das chuvas nos meses úmidos e redução da precipitação nos meses secos, principalmente no cenário SSP5-8.5 que projeta um aumento médio mensal de 3,4% na precipitação.

Ambos os cenários projetaram aquecimento, com elevações nas temperaturas máximas e mínimas. No cenário SSP5-8.5 foram observados aumentos de temperatura de até 3°C, atingindo temperaturas máximas de até 38°C. Em termos de vazão, o SSP2-4.5 aponta para reduções de vazões prolongadas nos períodos de seca, o que pode agravar a escassez hídrica por meio de maior evapotranspiração, enquanto o SSP5-8.5 apresenta maior variabilidade hidrológica, com maior aderência aos dados observados, com aumentos em cheias e reduções acentuadas em secas.

Esses resultados reforçam a necessidade de estabelecer estratégias para gestão integrada dos recursos hídricos, com foco na resiliência frente às mudanças climáticas, especialmente em regiões vulneráveis.

4. Referências

ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine / alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 333, p. 413–430, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>>.

ABBASPOUR, K. C.; VAGHEFI, S. A.; YANG, H.; SRINIVASAN, R. Global soil, landuse, evapotranspiration, historical and future weather databases for SWAT Applications. **Scientific Data**, v. 6, n. 1, p. 1–11, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41597-019-0282-4>>.

ABBASPOUR, K. C.; VAGHEFI, S. A.; SRINIVASAN, R. A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: A review of papers from the 2016 international SWAT conference. **Water Switzerland**, v. 10, n. 1, p. 6, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w10010006>>.

ABBASPOUR, K. C.; VEJDANI, M.; HAGHIGHAT, S. Swat-Cup2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs Manual Version 2. Duebendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2011. Disponível em: <<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3048705>>.

ABRO, M. I.; ZHU, D.; KHASKHELI, M. A.; ELAHI, E.; HASSAN, M. A. Statistical and qualitative evaluation of multi-sources for hydrological suitability in flood-prone areas of Pakistan. **Journal of Hydrology**, v. 588, p. 125117, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125117>>.

AHMED, E.; JANABI, F. A.; YANG, W.; ALI, A.; SADDIQUE, N.; KREBS, P. Comparison of flow simulations with sub-daily and daily GPM IMERG products over a transboundary Chenab River catchment. **Journal of Water and Climate Change**, v. 13, n. 3, p. 1204–1224, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.2166/wcc.2022.420>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil (1985–2017). 2. ed. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-e-embrapa->

identificam-forte-tendencia-de-crescimento-da-agricultura-irrigada-por-pivos-centrais-no-brasil/ana_levantamento-da-agricultura-irrigada-por-pivos-centrais_2019.pdf/view>.

ALMEIDA, A. L. S. P. Gestão dos recursos hídricos na bacia do Rio das Velhas: como podem os modelos hidrológicos distribuídos subsidiar o planejamento? 2019. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/30706>>.

ALTHOFF, D.; RIBEIRO, R. B.; NEIVA RODRIGUES, L. Gauging the ungauged: Regionalization of flow indices at grid level. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 26, n. 4, p. 4021008, 2021. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002067](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002067)>.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; DA SILVA, D. D. Impacts of climate change on the evaporation and availability of water in small reservoirs in the Brazilian savannah. **Climatic Change**, v. 159, n. 2, p. 215–232, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10584-020-02656-y>>.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. DA. Predicting runoff series in ungauged basins of the Brazilian Cerrado biome. **Environmental Modelling and Software**, v. 149, p. 105315, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105315>>.

ALVES, J. B.; SILVA, E. M. DA; RICKES, C. P. Downscaling dinâmico de precipitação e veranicos no estado do Ceará. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 4, p. 385–393, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.24221/jeap.2.4.2017.1428.385-393>>.

ALMEIDA, L. T.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; DOS SANTOS, G. R.; ABREU, M. C. Method to establish intense rainfall equations based in geoprocessing. **Environmental Modeling and Assessment**, v. 30, p. 141–155, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10666-024-09999-1>>.

AMORIM, J. DA S.; VIOLA, M. R.; JUNQUEIRA, R.; OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R. Evaluation of satellite precipitation products for hydrological modeling in the Brazilian

Cerrado biome. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 9, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w12092571>>.

ANDRADE FARIAS, C. W. L.; VIANA, J. F. S.; MIRANDA, R. Q.; SILVA, S. F.; VASCO, G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; GALVÍNCIO, J. D. Técnica de calibração para modelagem da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, Brasil, utilizando o SWAT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 3, p. 1621–1628, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.3.p1621-1628>>.

ARAZA, A.; PEREZ, M.; CRUZ, R. V.; AGGABAO, L. F.; SOYOSA, E. Probable streamflow changes and its associated risk to the water resources of Abuan watershed, Philippines caused by climate change and land use changes. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 35, n. 2, p. 389–404, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00477-020-01953-3>>.

ARKIN, P. A. The relationship between fractional coverage of high cloud and rainfall accumulations during GATE over the B-scale array. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 10, p. 1382–1887, 1979. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107<1382:TRBFCO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<1382:TRBFCO>2.0.CO;2)>.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>>.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.13031/2013.42256>>.

ARYAL, A.; TRAN, T. N. D.; KUMAR, B.; LAKSHMI, V. Evaluation of satellite-derived precipitation products for streamflow simulation of a mountainous Himalayan

watershed: A study of Myagdi Khola in Kali Gandaki Basin, Nepal. **Remote Sensing**, v. 15, n. 19, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs15194762>>.

AVILA-DIAZ, A.; BENEZOLI, V.; JUSTINO, F.; TORRES, R.; WILSON, A. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. **Climate Dynamics**, v. 55, n. 5–6, p. 1403–1426, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>>.

AWANGE, J. L.; HU, K. X.; KHAKI, M. The newly merged satellite remotely sensed, gauge and reanalysis-based multi-source weighted-ensemble precipitation: Evaluation over Australia and Africa (1981–2016). **Science of the Total Environment**, v. 670, p. 448–465, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.148>>.

BAKER, J. C. A.; DE SOUZA, D. C.; KUBOTA, P. Y.; BUERMANN, W.; COELHO, C. A. S.; ANDREWS, M. B.; GLOOR, M.; GARCIA-CARRERAS, L.; FIGUEROA, S. N.; SPRACKLEN, D. V. An assessment of land–atmosphere interactions over South America using satellites, reanalysis, and two global climate models. **Journal of Hydrometeorology**, v. 22, n. 4, p. 905–922, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0132.1>>.

BALLARIN, A. S.; SONE, J. S.; GESUALDO, G. C.; SCHWAMBACK, D.; REIS, A.; ALMAGRO, A.; WENDLAND, E. CLIMBra – Climate change dataset for Brazil. **Scientific Data**, v. 10, n. 1, p. 1–16, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41597-023-01956-z>>.

BAREZAEI, A.; JALALI, J. Comparison of simulated runoff based on ground rain gauges and PERSIANN-CDR satellite precipitation records using SWAT model. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 10, n. 4/W1-2022, p. 87–94, 2023. Disponível em: <<https://isprs-annals.copernicus.org/articles/X-4-W1-2022/87/2023/isprs-annals-X-4-W1-2022-87-2023.pdf>>.

BASHEER, M.; ELAGIB, N. A. Performance of satellite-based and GPCC 7.0 rainfall products in an extremely data-scarce country in the Nile Basin. **Atmospheric Research**, v. 215, p. 128–140, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.028>>.

BECK, H. E.; PAN, M.; ROY, T.; WEEDON, G. P.; PAPPENBERGER, F.; VAN DIJK, A. I. J. M.; HUFFMAN, G. J.; ADLER, R. F.; WOOD, E. F. Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 1, p. 207–224, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/hess-23-207-2019>>.

BECK, H. E.; ZIMMERMANN, N. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; WOOD, E. F. Publisher Correction: Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific Data**, v. 7, p. 274, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41597-020-00616-w>>.

BELETE, M.; DENG, J.; WANG, K.; ZHOU, M.; ZHU, E.; SHIFAW, E.; BAYISSA, Y. Evaluation of satellite rainfall products for modeling water yield over the source region of Blue Nile Basin. **Science of the Total Environment**, v. 708, p. 134834, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134834>>.

BOLFE, É. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. **Dinâmica agrícola no cerrado: Análises e Projeções**. 1. ed. Brasília, DF: **Embrapa**, 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1124106/dinamica-agricola-no-cerrado-analises-e-projecoes>>.

BUSICO, G.; COLOMBANI, N.; FRONZI, D.; PELLEGRINI, M.; TAZIOLI, A.; MASTROCICCO, M. Evaluating SWAT model performance, considering different soils data input, to quantify actual and future runoff susceptibility in a highly urbanized basin. **Journal of Environmental Management**, v. 266, p. 110625, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110625>>.

CAMBRAIA NETO, A. J.; RODRIGUES, L. N.; DA SILVA, D. D.; ALTHOFF, D. Impact of climate change on groundwater recharge in a Brazilian Savannah watershed. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 143, n. 3–4, p. 1425–1436, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00704-020-03477-w>>.

CAMPOS, J. DE O.; CHAVES, H. M. L. Trends and variabilities in the historical series of monthly and annual precipitation in cerrado biome in the period 1977–2010. **Revista**

Brasileira de Meteorologia, v. 35, n. 1, p. 157–169, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0102-7786351019>>.

CARVALHO, J. D. DE; MELO, M. C.; GALVÃO, P.; MIRANDA, W. L.; LASMAR, B. E. Água subterrânea em contexto de escassez hídrica na bacia hidrográfica do Rio São Francisco (MG). **Ambiente & Sociedade**, v. 27, p. e00177, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0177r5vu27L2AO>>.

CASTRO, K. B.; ROIG, H. L.; LIMA, J. E. F. W.; FERRIGO, S. Aplicação de série temporal mínima para simulação de vazões em bacia experimental do Cerrado. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 8, p. 1497–1513, 2016. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbc/a/vFjcjdfJdXtksSXb3xCR3ss/>>.

CAVALCANTE, J. B. Meio ambiente e agricultura: uma análise sobre o cerrado brasileiro e as políticas para proteção ambiental. **Revista Economia Política do Desenvolvimento**, v. 9, n. 21, p. 80–97, 2019. Disponível em: <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9300488>>.

CELANTE, R. **MSWEP como fonte alternativa de dados de precipitação para modelagem hidrológica com o SWAT em bacias hidrográficas com escassez de dados. Universidade Federal de Santa Maria**, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/24365>>.

CHEN, F. W.; LIU, C. W. Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. **Paddy and Water Environment**, v. 10, n. 3, p. 209–222, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10333-012-0319-1>>.

CHEN, G.; IWASAKI, T.; QIN, H.; SHA, W. Evaluation of the warm-season diurnal variability over East Asia in recent reanalyses JRA-55, ERA-Interim, NCEP CFSR, and NASA MERRA. **Journal of Climate**, v. 27, n. 14, p. 5517–5537, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00005.1>>.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the

Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 438–454, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>>.

CHOU, S. C.; DEREZYNSKI, C.; GOMES, J. L.; PESQUERO, J. F.; AVILA, A. M. H.; RESENDE, N. C.; ALVES, L. F.; RUIZ-CÁRDENAS, R.; SOUZA, C. R.; BUSTAMANTE, J. F. Ten-year seasonal climate reforecasts over South America using the Eta Regional Climate Model. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, n. 3, p. e20181242, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0001-3765202020181242>>.

CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. Evaluation of ETA Model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, n. 4, p. 537–555, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/npg-12-537-2005>>.

COSTA, M. M. L.; CAVALCANTE, A. S.; VILARINHO, C. M. R.; MULLER, M. G.; MONTE-MOR, R. C. A.; GONÇALVES, J. A. C. A geração de conflitos pelo uso da água na bacia do Rio Paracatu, Noroeste de Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 2, p. 1275–1291, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.2.p1275-1291>>.

DASH, S. S.; SAHOO, B.; RAGHUWANSHI, N. S. How reliable are the evapotranspiration estimates by Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and Variable Infiltration Capacity (VIC) models for catchment-scale drought assessment and irrigation planning? **Journal of Hydrology**, v. 592, p. 125838, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125838>>.

DATOK, P.; SAUVAGE, S.; PARIS, A.; DOS SANTOS, V.; OLIVEIRA, R. A. J.; GOSSET, M.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J. M. Regional studies evaluating the performance of multiple satellite-based precipitation products in the Congo River Basin using the SWAT model. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 42, p. 101168, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101168>>.

DHANESH, Y.; BINDHU, V. M.; SENENT-APARICIO, J.; BRIGHENTI, T. M.; AYANA, E.; SMITHA, P. S.; FEI, C.; SRINIVASAN, R. A comparative evaluation of the performance of CHIRPS and CFSR data for different climate zones using the SWAT model. **Remote Sensing**, v. 12, n. 18, p. 3088, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs12183088>>.

DU, H.; TAN, M. L.; ZHANG, F.; CHUN, K. P.; LI, L.; KABIR, M. H. Evaluating the effectiveness of CHIRPS data for hydroclimatic studies. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, n. 3, p. 1519–1539, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00704-023-04721-9>>.

DUARTE, S. N.; WOLFF, W.; NASCIMENTO, J. G.; LOPES, T. R.; CHARLES, T. S.; MARQUES, P. A. A.; PACHECO, A. B.; RICARDO, H. C. Streamflow regionalization in Brazil: Traditional methods and state of the art. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 9, p. e276836, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n9e276836>>.

DURÃES, M. F. **Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/REPA-8DMMHQ>>.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. DE; NAGHETTINI, M. Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in Paraopeba River Basin, MG. **Cerne**, v. 17, p. 481–488, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000400015>>.

EGER, G. Z. S.; SILVA JUNIOR, G. C.; MARQUES, E. A. G.; LEÃO, B. R. C.; ROCHA, D. G. T. B.; GILMORE, T. E.; AMARAL, L. G. H.; SILVA, J. A. O.; NEALE, C. Recharge assessment in the context of expanding agricultural activity: Urucuia Aquifer System, western State of Bahia, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 112, p. 103601, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103601>>.

EINI, M. R.; JAVADI, S.; DELAVAR, M.; DARAND, M. Accuracy of PERSIANN-CDR precipitation satellite database in simulation assessment of runoff in SWAT Model on Maharlu Basin. **Physical Geography Research**, v. 50, n. 3, p. 563–576, 2018. Disponível em: <https://jphgr.ut.ac.ir/article_69794.html?lang=en>.

EINI, M. R. Discussion of ‘Intra-and interannual streamflow variations of Wardha watershed under changing climate’ (2018). **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, v. 27, n. 4, p. 474–475, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09715010.2018.1564376>>.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA.
GEOINFO: Banco de dados georreferenciados sobre valores médios de erodibilidade e de características físicas, químicas e hidráulicas dos solos presentes no Cerrado do Brasil.

Disponível em: <https://geoinfo.cnpm.embrapa.br/layers/geonode%3Acerrados_bd1_v5b/metadata_read>.
Acesso em: 14 fev. 2021.

FARIAS, C. W. L. DE A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; VIANA, J. F. S.; GALVÍNCIO, J. D.; SILVA, S. F.; MIRANDA, R. Q. Trend correction of future climate projections simulated by the Eta-HadGEM2-ES regional model for the Mundaú River Basin, Northeastern Brazil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 3, p. 288–301, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.24221/jeap.5.3.2020.288-301>>.

FERRAZ, L. L.; SANTANA, G. M.; AMORIM, J. S.; DE JESUS, R. M.; SANTOS, C. A. Hydrological modeling in an agricultural basin in the Brazilian Cerrado using satellite precipitation data. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 130, p. 104548, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104548>>.

FERREIRA, F. L. V.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, F. B. Performance evaluation of climate models in the simulation of precipitation and average temperature in the Brazilian Cerrado. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, n. 2, p. 845–857, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00704-023-04665-0>>.

FERRIGO, S. **Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – estudo de caso da bacia do Lago Descoberto - DF. Universidade de Brasília**, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/15629>>.

FINCK, L. F.; LEITE, I. R.; ALMEIDA, A. K.; DE ALMEIDA, I. K. A streamflow regionalization method using hydrological data and geoprocessing tools—a Brazilian midwest analysis. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 133, p. 104695, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104695>>.

FRADE, T. G. **Modelagem Hidrológica Utilizando Os Dados De Precipitação Persiann-Cdr E O Modelo Swat Para a Bacia Do Rio Piancó - PB.** João Pessoa:

Universidade Federal da Paraíba, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/15779>>.

FU, Y.; XIA, J.; YUAN, W.; XU, B.; WU, X.; CHEN, Y.; ZHANG, H. Assessment of multiple precipitation products over major river basins of China. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 123, p. 11–22, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00704-014-1339-0>>.

FUKUNAGA, D. C.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S.; OLIVEIRA, L. T.; CAIADO, M. A. C. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **Catena**, v. 125, p. 206–213, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.032>>.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations – A new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, p. 150066, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>>.

FUNK, C. C.; PETERSON, P. J.; LANDSFELD, M. F.; PEDREROS, D. H.; VERDIN, J. P.; ROWLAND, J. D.; ROMERO, B. E.; HUSAK, G. J.; MICHAELSEN, J. C.; VERDIN, A. P. A Quasi-Global Precipitation Time Series for Drought Monitoring. **U.S. Geological Survey Data Series**, v. 832, p. 4, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.3133/ds832>>.

GALBETTI, M. V. **Avaliação dos efeitos hidrológicos da aplicação de cenários propostos pelo poder público. Estudo de caso: área de proteção ambiental de Campinas (SP)**. [s.l.]: **Universidade Estadual de Campinas**, 2021. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/20.500.12733/3037>>.

GOMES, L. C.; BIANCHI, F. J. J. A.; CARDOSO, I. M.; SCHULTE, R. P. O.; FERNANDES, R. B. A.; FERNANDES-FILHO, E. I. Disentangling the historic and future impacts of land use changes and climate variability on the hydrology of a mountain region in Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 594, p. 125650, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125650>>.

GRAHAM, L. P. Climate Change Effects on River Flow to the Baltic Sea. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, v. 33, n. 4, p. 235–241, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1579/0044-7447-33.4.235>>.

GUALDANI, C.; SOBRINHO, F. L. A. Modernização agrícola e os conflitos de uso da água na bacia hidrográfica do rio Urucuia, Noroeste de Minas Gerais. **Revista da ANPEGE**, v. 19, n. 38, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.5418/ra2023.v19i38.16440>>.

GUERMAZI, E.; MILANO, M.; REYNARD, E. Performance evaluation of satellite-based rainfall products on hydrological modeling for a transboundary catchment in northwest Africa. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 138, n. 3–4, p. 1695–1713, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00704-019-02928-3>>.

GUNATHILAKE, M. B.; ZAMRI, M. N. M.; ALAGIYAWANNA, T. P.; SAMARASINGHE, J. T.; BADDEWELA, P. K.; BABEL, M. S.; JHA, M. K.; RATHNAYAKE, U. S. Hydrologic utility of satellite-based and gauge-based gridded precipitation products in the Huai Bang Sai watershed of northeastern Thailand. **Hydrology**, v. 8, n. 4, p. 165, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/hydrology8040165>>.

GUPTA, H. V.; KLING, H.; YILMAZ, K. K.; MARTINEZ, G. F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1–2, p. 80–91, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>>.

HAJIHOSSEINI, H.; HAJIHOSSEINI, M.; MORID, S.; DELAVAR, M.; BOOIJ, M. J. Hydrological assessment of the 1973 treaty on the transboundary Helmand River, using the SWAT model and a global climate database. **Water Resources Management**, v. 30, n. 13, p. 4681–4694, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11269-016-1447-y>>.

HAMAL, K.; SHARMA, S.; KHADKA, N.; BANIIYA, B.; ALI, M.; SHRESTHA, M. S.; XU, T.; SHRESTHA, D.; DAWADI, B. Evaluation of MERRA-2 precipitation products using gauge observation in Nepal. **Hydrology**, v. 7, n. 3, p. 40, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/hydrology7030040>>.

HARDANTO, A.; MUSTOFA, A.; ARDIANSYAH, A. Water recharge variability across Serayu watershed using Soil Water Assessment Tool (SWAT). **Proceeding ICMA-**

SURE, v. 2, n. 1, p. 205–212, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.20884/2.prosicma.2023.2.1.8425>>.

HERSBACH, H. ECMWF's ERA5 reanalysis extends back to 1979. **ECMWF Newsletter**, v. 158, p. 1–2, 2019. Disponível em: <<https://www.ecmwf.int/en/newsletter/158/news/ecmwfs-era5-reanalysis-extends-back-1979>>.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; SCHEPERS, D.; SIMMONS, A.; SOCI, C.; ABDALLA, S.; ABELLAN, X.; BALSAMO, G.; BECHTOLD, P.; BIAVATI, G.; BIDLOT, J.-R.; BONAVITA, M.; CHIARA, G.; DAHLGREN, P.; DEE, D.; DIAMANTAKIS, M.; DRAGANI, R.; FLEMMING, J.; FORBES, R. B.; FUENTES, M.; GEER, A.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S. B.; HOGAN, R. J.; HÓLM, E.; JANISKOVÁ, M.; KEELEY, S.; LALOYEAUX, P.; LOPEZ, P.; LUPU, C.; RADNOTI, G.; DE ROSNAY, P.; ROZUM, I.; VAMBORG, F. S. E.; VILLAUME, S. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/qj.3803>>.

HOBBI, S.; PAPALEXIOU, S. M.; RAJULAPATI, C. R.; NERANTZAKI, S. D.; MARKONIS, Y.; TANG, G.; CLARK, M. P. Detailed investigation of discrepancies in Köppen-Geiger climate classification using seven global gridded products. **Journal of Hydrology**, v. 612, n. PB, p. 128121, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128121>>.

IGLESIAS, A.; GARROTE, L. Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. **Agricultural Water Management**, v. 155, p. 113–124, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.014>>.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS – IGAM. Monitoramento da disponibilidade das águas. Disponível em: <<https://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/monitoramento-de-qualidade-das-aguas>>. Acesso em: 23 nov. 2022.

JAHANSHAH, A.; PATIL, S. D.; GOHARIAN, E. Identifying most relevant controls on catchment hydrological similarity using model transferability – A comprehensive study in

Iran. **Journal of Hydrology**, v. 612, n. PB, p. 128193, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128193>>.

JAHANSHAHI, A.; ROSHUN, S. H.; BOOIJ, M. J. Comparison of satellite-based and reanalysis precipitation products for hydrological modeling over a data-scarce region. **Climate Dynamics**, v. 62, p. 3505–3537, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00382-023-07078-x>>.

JIANG, Q.; LI, W.; FAN, Z.; HE, X.; SUN, W.; CHEN, S.; WEN, J.; GAO, J.; WANG, J. Evaluation of the ERA5 reanalysis precipitation dataset over Chinese Mainland. **Journal of Hydrology**, v. 595, p. 125660, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125660>>.

JIMENO-SÁEZ, P.; BLANCO-GÓMEZ, P.; PÉREZ-SÁNCHEZ, J.; CECILIA, J. M.; SENENT-APARICIO, J. Impact assessment of gridded precipitation products on streamflow simulations over a poorly gauged basin in El Salvador. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 18, p. 2497, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w13182497>>.

JUNQUEIRA, R.; VIOLA, M. R.; AMORIM, J. S.; MELLO, C. R. Hydrological response to drought occurrences in a Brazilian savanna basin. **Resources**, v. 9, n. 10, p. 123, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/resources9100123>>.

JUNQUEIRA, R.; VIOLA, M. R.; AMORIM, J. S.; CAMARGOS, C.; MELLO, C. R. Hydrological modeling using remote sensing precipitation data in a Brazilian savanna basin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 115, p. 103773, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103773>>.

KOLLURU, V.; KOLLURU, S.; KONKATHI, P. Evaluation and integration of reanalysis rainfall products under contrasting climatic conditions in India. **Atmospheric Research**, v. 246, p. 105121, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105121>>.

KOURTIS, M.; BELLOS, V.; ZOTOU, I.; VANGELIS, H.; TSIHRINTZIS, V. A. Point-to-pixel comparison of a satellite and a gauge-based Intensity-Duration-Frequency (IDF) curve: The case of Karditsa, Greece. **Proceedings of the 7th IAHR Europe Congress**, Athens, Greece, 2022. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/364030695>>.

LEONI SCHIRMEISTER, Z.; ZIESE, M.; RUSTEMEIER, E.; FINGER, P.; HELLER, A.; SCHULZE, R.; ZEPPERITZ, M.; FRÄNKLING, S.; HELLER, B.; BREIDENBACH, J. N. Overview of the gridded daily and monthly precipitation data sets provided by the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). **EGU General Assembly Conference Abstracts**, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-21922>>.

LÈYE, I.; SAMBOU, S.; SANÉ, M. L.; NDIAYE, I.; NDIONE, D. M.; KANE, S.; DIATTA, S.; DIÉDHIYOU, R.; CISSÉ, M. T. Hydrological modeling of an ungauged river basin using SWAT model for water resource management: Case of Kayanga River upstream Niandouba Dam. **Journal of Water Resources and Ocean Science**, v. 9, n. 1, p. 29–41, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.11648/j.wros.20200901.14>>.

LI, X.; LI, Z.; LIN, Y. Suitability of TRMM products with different temporal resolution (3-hourly, daily, and monthly) for rainfall erosivity estimation. **Remote Sensing**, v. 12, n. 23, p. 3924, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs12233924>>.

LIMA, J. A.; DAMBROS, M. V. R.; ANTONIO, M. A. P. M.; JANZEN, J. G.; MARCHETTO, M. Potencial da economia de água potável pelo uso de água pluvial: análise de 40 cidades da Amazônia. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 291–298, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000300012>>.

LOPES, T. R.; ZOLIN, C. A.; MINGOTI, R.; VENDRUSCULO, L. G.; ALMEIDA, F. T.; SOUZA, A. P.; OLIVEIRA, R. F.; PAULINO, J.; ULIANA, E. M. Hydrological regime, water availability and land use/land cover change impact on the water balance in a large agriculture basin in the Southern Brazilian Amazon. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 108, p. 103224, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103224>>.

LUO, X.; WU, W.; HE, D.; LI, Y.; JI, X. Hydrological simulation using TRMM and CHIRPS precipitation estimates in the Lower Lancang-Mekong River Basin. **Chinese Geographical Science**, v. 29, n. 1, p. 13–25, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11769-019-1014-6>>.

LV, A.; QI, S.; WANG, G. Multi-model driven by diverse precipitation datasets increases confidence in identifying dominant factors for runoff change in a subbasin of the

Qaidam Basin of China. **Science of the Total Environment**, v. 802, p. 149831, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149831>>.

MAHTO, S. S.; MISHRA, V. Does ERA-5 outperform other reanalysis products for hydrologic applications in India? **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 16, p. 9423–9441, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2019JD031155>>.

MARARAKANYE, N.; LE ROUX, J. J.; FRANKE, A. C. Using satellite-based weather data as input to SWAT in a data poor catchment. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 117, p. 102871, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102871>>.

MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI JUNIOR, J. C.; MAGALHÃES FILHO, L. N. L. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35–47, 2012. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/229390302.pdf>>.

MASCITELLI, A.; FEDERICO, S.; FORTUNATO, M.; AVOLIO, E.; TORCASIO, R. C.; REALINI, E.; MAZZONI, A.; TRANSERICI, C.; CRESPI, M.; DIETRICH, S. Data assimilation of GPS-ZTD into the RAMS model through 3D-Var: preliminary results at the regional scale. **Measurement Science and Technology**, v. 30, n. 5, p. 055801, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab0b87>>.

MEDEIROS, F. J. DE. **Extremos climáticos de precipitação e suas projeções sobre o Brasil utilizando as gerações de modelos do CMIP**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2024. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/60654>>.

MEDELLÍN-AZUARA, J.; HAROU, J. J.; OLIVARES, M. A.; MADANI, K.; LUND, J. R.; HOWITT, R. E.; TANAKA, S. K.; JENKINS, M. W.; ZHU, T. Adaptability and adaptations of California's water supply system to dry climate warming. **Climatic Change**, v. 87, n. 1 SUPPL, p. S75–S90, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10584-007-9355-z>>.

MENDES, F. D. D. S. **Avaliação da aplicação do modelo SWAT para simulações hidrológicas na bacia hidrográfica do rio Bicudo, em Minas Gerais**. Itajubá: Universidade

Federal de Itajubá, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/handle/123456789/2814>>.

MENDONÇA, L. M.; BLANCO, C.; CRUZ, J. DA S. Impact of climate change on rainfall erosivity in the Amazon and Cerrado biomes under CMIP6 scenarios. **Journal of Sedimentary Environments**, v. 5, n. 2, p. 1–23, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s43217-025-00237-6>>.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, v. 19, p. 205–234, 1965. Disponível em: <<https://repository.rothamsted.ac.uk/item/8v5v7/evaporation-and-environment>>.

MOREIRA, M.; SILVA, D. D.; LARA, M. S.; PRUSKI, F. F. Índices de conflito pelo uso da água da bacia do Ribeirão Entre Ribeiros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 221–228, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p221-228>>.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.13031/2013.23153>>.

MORAES, J. B.; WANDERLEY, H. S.; DELGADO, R. C. Areas susceptible to desertification in Brazil and projected climate change scenarios. **Natural Hazards**, v. 116, n. 2, p. 1463–1483, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11069-022-05724-x>>.

NASA JPL. **NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001** [Data set]. **NASA EOSDIS Land Processes DAAC**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/MEaSURES/NASADEM/NASADEM_HGT.001>. Acesso em: 14 sep. 2022.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)>.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009**. College Station: **Texas Water**

Resources Institute, p. 1–647, 2011. Disponível em: <<https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>>. Acesso em: 23 jul. 2025.

ODUSANYA, A. E.; SCHULZ, K.; MEHDI-SCHULZ, B. Using a regionalisation approach to evaluate streamflow simulated by an ecohydrological model calibrated with global land surface evaporation from remote sensing. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 40, p. 101042, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101042>>.

OLIVEIRA SERRÃO, E. A.; SILVA, M. T.; SALVIANO, F. A. S.; PONTES, P. R. M.; LIMA, A. M. M. Influência do uso e cobertura da terra na variabilidade espacial e temporal da evapotranspiração no sudeste da Amazônia, utilizando o modelo SWAT. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 4, p. 134–148, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.004.0012>>.

OLIVEIRA SERRÃO, E. A.; PONTES, P. R. M.; LOPES CAVALCANTE, R. B.; XAVIER, A. C. F.; FERREIRA, T. R.; TERASSI, P. M. B. Hydrological processes in a watershed on the transition from Amazon to Cerrado in Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 129, p. 104507, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104507>>.

OLIVEIRA, V. A.; DE MELLO, C. R.; BESKOW, S.; VIOLA, M. R.; SRINIVASAN, R. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, v. 133, p. 20–31, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>>.

PAGLIERO, L.; BOURAOUI, F.; DIELS, J.; WILLEMS, P.; MCINTYRE, N. Investigating regionalization techniques for large-scale hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v. 570, p. 220–235, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.071>>.

PANG, J.; ZHANG, H.; XU, Q.; WANG, Y.; WANG, Y.; ZHANG, O.; HAO, J. Hydrological evaluation of open-access precipitation data using SWAT at multiple temporal and spatial scales. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 7, p. 3603–3626, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/hess-24-3603-2020>>.

PEREIRA, D. D. R. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT**. Viçosa: **Universidade Federal de Viçosa**, 2013. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/744>>. Acesso em: 23 jul. 2025.

PEREIRA, D. R.; OLIVEIRA, A. R.; COSTA, M. S.; RAMOS, T. B.; ROLLNIC, M.; NEVES, R. J. J. Evaluation of precipitation products in a Brazilian watershed: Tocantins-Araguaia watershed case study. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, n. 8, p. 7845–7865, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00704-024-05091-6>>.

PEREIRA, D.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 7, p. 14–37, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.05.002>>.

PERIN, D. Facilitating student learning through contextualization: A review of evidence. **Community College Review**, v. 39, n. 3, p. 268–295, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0091552111416227>>.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUEZ, R. G.; NOVAES, L. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M.; TEIXEIRA, A. F. Impacto das vazões demandadas pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano, na bacia do Paracatu. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 2, p. 199–210, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000200011>>.

QI, W.; WANG, S.; CHEN, J. Inter-comparison of multiple gridded precipitation datasets over different climates at global scale. **Water**, v. 16, n. 11, p. 1553, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w16111553>>.

RAMOS, M. M.; PRUSKI, F. F. **Quantificação e análise da eficiência do uso da água pelo setor agrícola na bacia do São Francisco**. In: Projeto Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco. Viçosa: **Universidade Federal de Viçosa**, 2003. Disponível em: <<https://cdn.agenciapeixevivo.org.br/media/2019/06/Quantificacao-e-Analise-da-eficiencia-do-Uso-da-Agua-pelo-setor-agricola-na-BSF.pdf>>. Acesso em: 23 jul. 2025.

RANKE, B. S.; RODRIGUES, L. N.; CHOU, S. C. Estimating irrigation demand based on seasonal climate forecasts. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 4, e284685, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n4e284685>>.

RAUTELA, K. S.; KUMAR, M.; SOFI, M. S.; KUNIYAL, J. C.; BHAT, S. U. Modelling of streamflow and water balance in the Kuttiyadi River Basin using SWAT and remote sensing/GIS tools. **International Journal of Environmental Research**, v. 16, n. 4, p. 1–14, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s41742-022-00416-7>>.

REBOITA, M. S.; KUKI, C. A. C.; MARRAFON, V. H.; SOUZA, C. A.; FERREIRA, G. W. S.; TEODORO, T.; LIMA, J. W. M. South America climate change revealed through climate indices projected by GCMs and Eta-RCM ensembles. **Climate Dynamics**, v. 58, n. 1, p. 459–485, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00382-021-05918-2>>.

REN, P.; LI, J.; FENG, P.; GUO, Y.; MA, Q. Evaluation of multiple satellite precipitation products and their use in hydrological modelling over the Luanhe River Basin, China. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 6, p. 677, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w10060677>>.

RIBEIRO, E. M.; GALIZONI, F. M.; CRUZ, G. C.; SILVA, K. A. Agricultura familiar e programas de abastecimento de água no gerais do Alto-Médio rio São Francisco, Minas Gerais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, n. 4, p. e274867, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9479.2023.274867>>.

RIBEIRO, R. B.; PRUSKI, F. F.; OLIVEIRA, J. S.; FILGUEIRAS, R.; ALTHOFF, D.; PINTO, E. J. D. Streamflow regionalization considering water balance with actual evapotranspiration estimated from remote sensing. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 27, n. 8, p. 4022012, 2022. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002123](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002123)>.

RIBEIRO, R. E.; ALMEIDA, R. A.; PINTO, D. B. F. Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Mucuri em escalas temporais mensal e diária. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 3, p. e3266, 2024. Disponível em: <<https://conbea.org.br/anais/publicacoes/conbea-2024/engenharia-de-agua-e-solo-eas-7/4077-modelagem-da-vazao-no-rio-mucuri-com-a-utilizacao-do-swat-em-base-mensal/file>>. Acesso em: 23 jul. 2025.

RINCÓN-AVALOS, P.; KHOUAKHI, A.; MENDOZA-CANO, O.; LÓPEZ-DE LA CRUZ, J.; PAREDES-BONILLA, K. M. Evaluation of satellite precipitation products over Mexico using Google Earth Engine. **Journal of Hydroinformatics**, v. 24, n. 4, p. 711–729, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.2166/hydro.2022.122>>.

RODRIGUES, J. A. M.; VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; MORAIS, M. A. V. Hydrological regionalization of streamflows for the Tocantins River Basin in Brazilian Cerrado biome. **Revista Ambiente e Água**, v. 16, n. 6, p. 2–16, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2716>>.

RODRIGUES, L. F.; LIMA, S. S. T.; RUIZ, R. S. R.; PANETTA, J.; FREITAS, S. R.; CAMPOS VELHO, H. F. Parallel version for the BRAMS with Runge-Kutta dynamical core. In: **Conference of Computational Interdisciplinary Science**, Atlanta, EUA, 2019. Anais... Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/355454618_Parallel_version_for_the_BRAMS_with_Runge-Kutta_dynamical_core>.

RODRIGUES, L. N.; ALTHOFF, D.; FARIAS, D. B. S.; SANO, E. E.; BETTIOL, G. M.; CAMPOS, J. E. G.; SANTANA, N. C.; AUGUSTO, V. A. **Agricultura irrigada no cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável**. Brasília, DF: **Embrapa Cerrados**, 2023. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1154164/agricultura-irrigada-no-cerrado-subsidios-para-o-desenvolvimento-sustentavel>>.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F. **Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**. Fortaleza: **INOVAGRI**, 2017. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1081898>>.

RODRIGUES, L. N.; SCHULER, A. E. **Água: desafios para a sustentabilidade da agricultura**. Brasília, DF: **Embrapa**, 2016. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1145397>>.

RODRIGUES, L. N.; ZACCARIA, D. **Agricultura irrigada: um breve olhar**. Fortaleza, CE: **Instituto de Pesquisa e Inovação na Agricultura Irrigada – INOVAGRI**, 2020. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1127536>>. Acesso em: 23 jul. 2025.

SADEGHI, M.; NGUYEN, P.; NAEINI, M. R.; HSU, K.; BRAITHWAITE, D.; SOROOSHIAN, S. PERSIANN-CCS-CDR, a 3-hourly 0.04° global precipitation climate data record for heavy precipitation studies. **Scientific Data**, v. 8, n. 1, p. 1–11, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41597-021-00940-9>>.

SANTOS, L. DA C.; FIGUEIRÓ, L. S. P.; BENDER, F. D.; JOSÉ, J. V.; SANTOS, A. V.; ARAUJO, J. E.; MACHADO, E. L. M.; SILVA, R. S.; COSTA, J. O. Unveiling climate trends and future projections in Southeastern Brazil: a case study of Brazil's historic agricultural heritage. **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 11, p. 4811, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su16114811>>.

SANTOS, D. J.; PEDRA, G. U.; SILVA, M. G. B.; GUIMARÃES JÚNIOR, C. A.; ALVES, L. M.; SAMPAIO, G.; MARENGO, J. A. Mudanças futuras de precipitação e temperatura no Brasil a partir dos níveis de aquecimento global de 1,5 °C, 2 °C e 4 °C. **Sustentabilidade em Debate**, v. 11, n. 3, p. 375–393, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33933>>.

SOUZA, A. S.; CORREA, C. S.; MARTIN, I. M. Avaliação do modelo regional climático para a previsão de temperatura no centro de lançamento de Alcântara: Evaluation of the climate regional model for temperature forecast at the Alcântara launch center. **Latin American Journal of Development**, v. 3, n. 5, p. 2908–2921, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.46814/lajdv3n5-019>>.

SOUZA, R. M.; VIOLA, M. R.; CHOU, S. C.; ALVES JUNIOR, M. V. G.; AVANZI, J. C. Projeções climáticas regionalizadas para o estado do Tocantins, Brasil, nos Cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, p. 330–347, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.5380/abclima.v24i0.57052>>.

SCHNEIDER, U.; BECKER, A.; FINGER, P.; MEYER-CHRISTOFFER, A.; ZIESE, M.; RUDOLF, B. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 115, n. 1–2, p. 15–40, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00704-013-0860-x>>.

SCHNEIDER, U.; ZIESE, M.; MEYER-CHRISTOFFER, A.; FINGER, P.; RUSTEMEIER, E.; BECKER, A. The new portfolio of global precipitation data products of

the Global Precipitation Climatology Centre suitable to assess and quantify the global water cycle and resources. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 374, p. 29–34, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/piahs-374-29-2016>>.

SCHOPPA, L.; DISSE, M.; BACHMAIR, S. Evaluating the performance of random forest for large-scale flood discharge simulation. **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 125531, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125531>>.

SELLAMI, H.; LA JEUNESSE, I.; BENABDALLAH, S.; BAGHDADI, N.; VANCLOOSTER, M. Uncertainty analysis in model parameters regionalization: a case study involving the SWAT model in Mediterranean catchments (Southern France). **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 6, p. 2393–2413, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/hess-18-2393-2014>>.

SERRÃO, E. A. O. **Aplicação do modelo SWAT na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas-PA**. Campina Grande, PB: **Universidade Federal de Campina Grande – UFCG**, 2018. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1756>>.

SILVA, R. M.; DANTAS, J. C.; BELTRÃO, J. A.; SANTOS, C. A. G. Hydrological simulation in a tropical humid basin in the cerrado biome using the SWAT model. **Hydrology Research**, v. 49, n. 3, p. 908–923, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.2166/nh.2018.222>>.

SILVA TAVARES, P.; ACOSTA, R.; NOBRE, P.; RESENDE, N. C.; CHOU, S. C.; LYRA, A. A. Water balance components and climate extremes over Brazil under 1.5 °C and 2.0 °C of global warming scenarios. **Regional Environmental Change**, v. 23, n. 1, p. 40, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10113-023-02042-1>>.

SHAH, S.; DUAN, Z.; SONG, X.; LI, R.; MAO, H.; LIU, J.; MA, T.; WANG, M. Evaluating the added value of multi-variable calibration of SWAT with remotely sensed evapotranspiration data for improving hydrological modeling. **Journal of Hydrology**, v. 603, p. 127046, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127046>>.

SHAHID, M.; RAHMAN, K. U.; HAIDER, S.; GABRIEL, H. F.; KHAN, A. J.; PHAM, Q. B.; MOHAMMADI, B.; LINH, N. T. T.; ANH, D. T. Assessing the potential and

hydrological usefulness of the CHIRPS precipitation dataset over a complex topography in Pakistan. **Hydrological Sciences Journal**, v. 66, n. 11, p. 1664–1684, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1957476>>.

SHAIKH, M. M.; LODHA, P. P.; ESLAMIAN, S. Automatic calibration of SWAT hydrological model by SUFI-2 algorithm. **International Journal of Hydrology Science and Technology**, v. 13, n. 3, p. 324–334, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1504/IJHST.2022.121850>>.

SILVA, C. C. DA. **Variabilidade e mudanças climáticas (P e T) na Bacia do rio Descoberto (DF), no período entre 1986 e 2080**. Brasília: **Universidade de Brasília**, 2021. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/29943>>. Acesso em: 23 jul. 2025.

SILVA, F. D. M. DI. **Aplicabilidade do modelo SWAT na simulação de vazão em bacia hidrográfica do cerrado utilizando valores de parâmetros regionalizados**. Brasília: **Universidade de Brasília**, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/22452>>. Acesso em: 23 jul. 2025.

SILVA, J. S.; UTSUMI, A. G.; DOS SANTOS, C. E. D. Potencial de utilização de água de reúso em Polo Nacional de Agricultura Irrigada. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 3, p. 1175–1185, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.3.p1175-1185>>.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; LIU, Z.; BERNER, J.; WANG, W.; POWERS, J. G.; DUDA, M. G.; BARKER, D. M.; HUANG, X.-Y. **A description of the advanced research WRF version 4**. Boulder, CO: **National Center for Atmospheric Research – NCAR Technical Note NCAR/TN-556+STR**, v. 145, 2019. Disponível em: <<https://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes%3A588>>. Acesso em: 23 jul. 2025.

SONE, J. S.; ARAUJO, T. F.; GESUALDO, G. C.; BALLARIN, A. S.; CARVALHO, G. A.; OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E. C. Water security in an uncertain future: contrasting realities from an availability-demand perspective. **Water Resources Management**, v. 36, n. 8, p. 2571–2587, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11269-022-03160-x>>.

SOULIS, K. X. Soil conservation service curve number (SCS-CN) method: current applications, remaining challenges, and future perspectives. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 2, p. 192, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w13020192>>.

SOUZA, C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; OLIVEIRA, S. W.; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs12172735>>.

SOUZA, M. N.; MANTOVANI, E. C.; SILVA JÚNIOR, A. G.; GRIFFITH, J. J.; DELGADO, R. C. Avaliação do comportamento hidrológico na bacia do Ribeirão Entre Ribeiros, afluente do Rio Paracatu, em cenário de mudança climática com o uso do software STELLA. **Revista Engenharia na Agricultura – Reveng**, v. 18, n. 4, p. 339–351, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.13083/reveng.v18i4.50>>.

SOUZA, S. A.; RODRIGUES, L. N.; DA CUNHA, F. F. Assessing the precision irrigation potential for increasing crop yield and water savings through simulation. **Precision Agriculture**, v. 24, n. 2, p. 533–559, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11119-022-09958-4>>.

STUDART, T. M. DE C.; CAMPOS, J. N. B.; SOUZA FILHO, F. A.; PINHEIRO, M. I. T.; BARROS, L. S. Turbulent waters in Northeast Brazil: a typology of water governance-related conflicts. **Environmental Science and Policy**, v. 126, p. 99–110, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.09.014>>.

SUÊNIO ANDERSON, S. A. F.; COELHO, V. H. R.; TSUYUGUCHI, B. B.; GALVÃO, C. O.; RÊGO, J. C.; ALMEIDA, C. N.; ABELS, A. K.; PINNEKAMP, J.; RUFINO, I. A. A. Spatial multicriteria approach to support water resources management with multiple sources in semi-arid areas in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 297, p. 113399, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113399>>.

SWAIN, J. B.; PATRA, K. C. Streamflow estimation in ungauged catchments using regionalization techniques. **Journal of Hydrology**, v. 554, p. 420–433, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.003>>.

SWALIH, S. A.; KAHYA, E. Performance of gridded precipitation products in the Black Sea region for hydrological studies. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 149, n. 1–2, p. 465–485, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00704-022-04054-z>>.

TAN, M. L.; SAMAT, N.; CHAN, N. W.; ROY, R. Hydro-meteorological assessment of three GPM satellite precipitation products in the Kelantan River Basin, Malaysia. **Remote Sensing**, v. 10, n. 7, p. 1011, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs10071011>>.

TAN, M. L.; GASSMAN, P. W.; LIANG, J.; HAYWOOD, J. M. A review of alternative climate products for SWAT modelling: Sources, assessment and future directions. **Science of the Total Environment**, v. 795, p. 148915, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148915>>.

TEODORO, T. A.; PASSOS, R. B.; SILVA, B. A.; SILVA, B. C. Análise das estimativas da precipitação diária do produto GPM-IMERG na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, região Sudeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 43, n. 2, p. 449–459, 2020. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/37431>>.

TUY, S.; LEE, H. S.; CHRENG, K. Integrated assessment of offshore wind power potential using Weather Research and Forecast (WRF) downscaling with Sentinel-1 satellite imagery, optimal sites, annual energy production and equivalent CO₂ reduction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 163, p. 112501, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112501>>.

ULIANA, E. M.; SILVA, D. D.; MOREIRA, M. C.; PEREIRA, D. R.; ALMEIDA, F. T. Hybrid hydrological model for water flow prediction in the Piracicaba River Basin-MG, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 4, p. 471–480, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0102-7786344006>>.

VAN LIEW, M. W.; MITTELSTET, A. R. Comparison of three regionalization techniques for predicting streamflow in ungaged watersheds in Nebraska, USA using SWAT

model. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 11, n. 3, p. 110–119, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3528>>.

VASCONCELOS, V. V. **Recarga de aquíferos: subsídios à gestão hídrica e ambiental – Bacia do Rio Paracatu-SF7**. Ouro Preto: **Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**, 2014. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais). Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/10338>>.

VASCONCELOS, V. V.; JUNIOR, P. P. M.; HADAD, R. M. Metodologia cartográfica para avaliação de favorabilidade de recarga de aquíferos: estudo de caso para a Bacia do Rio Paracatu, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi – Ciências Naturais**, v. 8, n. 2, p. 153–176, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v8i2.571>>. Acesso em: 23 jul. 2025.

VERGARA, F.; NODA, F.; SOUZA, D.; MACIEL, G. F.; OLIVEIRA, R. Aplicação do modelo Soil And Water Assessment Tool (SWAT) na bacia hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território (GOT)**, v. 21, p. 159–187, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.17127/got/2021.21.007>>.

WANG, G.; YANG, H.; WANG, L.; XU, Z.; XUE, B. Using the SWAT model to assess impacts of land use changes on runoff generation in headwaters. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 3, p. 1032–1042, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/hyp.9620>>.

ZANIN, P. R.; BONUMA, N. B.; CORSEUIL, C. W. Hydrosedimentological modeling with SWAT using multi-site calibration in nested basins with reservoirs. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, e54, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820170153>>.