

**EFEITOS DE FUTUROS REGIMES DE PRECIPITAÇÃO NO
ESCOAMENTO SUPERFICIAL E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS
EM UMA BACIA DA REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL**

Por

Tatiane Gomes Frade

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Fevereiro de 2023

**EFEITOS DE FUTUROS REGIMES DE PRECIPITAÇÃO NO
ESCOAMENTO SUPERFICIAL E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS
EM UMA BACIA DA REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Tatiane Gomes Frade

Orientador: Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos

Coorientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

João Pessoa – Paraíba

Fevereiro de 2023

**Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação**

F799e Frade, Tatiane Gomes.

Efeitos de futuros regimes de precipitação no escoamento superficial e produção de sedimentos em uma bacia da região semiárida do Brasil / Tatiane Gomes Frade. - João Pessoa, 2023.

91 f. : il.

Orientação: Celso Augusto Guimarães Santos.

Coorientação: Richard Marques da Silva.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Engenharia civil e ambiental. 2. Secas hidrológicas. 3. Produção de sedimentos. I. Santos, Celso Augusto Guimarães. II. Silva, Richard Marques da. III. Título.

UFPB/BC

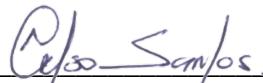
CDU 624:504(043)

TATIANE GOMES FRADE

**EFEITOS DE FUTUROS REGIMES DE PRECIPITAÇÃO NO
ESCOAMENTO SUPERFICIAL E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS
EM UMA BACIA DA REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL**

Dissertação de aprovada em 23/02/2023 como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA:



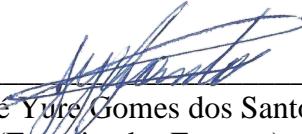
Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos – UFPB
(Orientador)



Prof. Dr. Richard Marques da Silva – UFPB
(Coorientador)



Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho – UFPB
(Examinador Interno)


Prof. Dr. Jose Yure Gomes dos Santos – UFRN
(Examinador Externo)

Dedico aos que me acompanharam ao longo dessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por Sua infinita misericórdia, pelas bênçãos concedidas ao longo de minha vida, pelos livramentos dados, pelo Seu grande amor por mim e por ter me sustentado nos momentos em que precisei.

À minha mãe, a qual eu tenho a sorte de ter também como minha melhor amiga, por ser meu porto seguro e meu alicerce. Muito obrigada por todo o amor que a senhora me dá, pelos ensinamentos, pelos abraços apertados e por sempre ter as melhores palavras para mim.

Ao meu pai, por ter me proporcionado uma boa educação, por todo amor e por ter me dado o seu melhor.

Ao meu vovô Rosalvo, por ter sido meu segundo pai, por tudo o que o senhor fez e ainda faz por nossa família, por ser um homem íntegro, honrado e de um coração imenso. O senhor me inspira na vida, na família e na polícia. E também à Vovó Jovita, que sempre fez todo o possível por mim, que a minha vida seja para orgulhar a senhora, continue cuidando de nós aí de cima.

Ao meu esposo, por todo carinho, cumplicidade e reciprocidade, por apoiar minhas decisões e por trilhar junto comigo os caminhos da vida. Obrigada por ser essa pessoa exemplar, gentil, respeitosa e amorosa. Sou muito grata a Deus por ter lhe colocado em minha vida.

Aos meus irmãos, tios e primos, obrigada por cada contribuição que vocês fizeram em minha vida. Tudo o que existe de bom em mim possui parte de vocês, pois cada um me ajudou e me apoiou, de maneira memorável, na conquista de coisas boas no meu caminho.

Aos meus professores Celso e Richard, por todas as portas que os senhores abriram para mim, por todos os aprendizados, por terem me impulsionado a ir mais longe e pela compreensão quando busquei trilhar outros caminhos. Os senhores são profissionais excelentes e dignos da gratidão dos inúmeros alunos que tiveram a oportunidade de aprender com os senhores.

À UFPB, por ter me proporcionado um ensino gratuito e de ótima qualidade na graduação e na pós-graduação e por ter mudado a minha vida e a de tantos outros alunos através da educação.

RESUMO

A disponibilidade de água e a produção de sedimentos em bacias semiáridas são influenciadas, dentre outros fatores, pelas mudanças climáticas, que representam uma ameaça ao ecossistema e ao gerenciamento dos recursos hídricos. Percebe-se que as secas hidrológicas têm aumentado gradualmente em severidade, duração e ocorrência ao longo dos anos, o que desperta a atenção de pesquisadores sobre os impactos futuros na disponibilidade hídrica e na produção de sedimentos causados por mudanças climáticas. Este trabalho objetiva estimar a produção de sedimentos ocorrida em eventos de seca hidrológica futuros na bacia hidrográfica do Rio Piancó, com base em cenários climáticos futuros baseados na emissão de gases do efeito estufa. Os efeitos de futuros regimes de precipitação no escoamento superficial e na produção de sedimentos na área de estudo foram analisados utilizando o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) e o índice de seca *Streamflow Drought Index* (SDI). Neste estudo, foram analisados dois cenários climáticos futuros, RCP 4.5 (otimista) e RCP 8.5 (pessimista). Para a calibração do modelo SWAT, foi usado o software *SWAT Calibration and Uncertainty Programs* (SWAT-CUP), sendo o período de calibração de 1993 — 2005 e o de validação de 2008 — 2012. Após esses procedimentos, os dados de previsão climática dos cenários otimista e pessimista foram utilizados para obtenção de séries temporais futuras de vazão e produção de sedimentos, usando o modelo SWAT. Em seguida, o SDI foi calculado com base nas séries de vazões futuras simuladas para a identificação dos eventos de secas na bacia. Os resultados do estudo mostraram que a calibração e a validação do modelo apresentaram ajustes muito bons: $R^2 = 0,83$ e $NSE = 0,82$ e $R^2 = 0,89$ e $NSE = 0,77$, respectivamente. Observaram-se reduções de volume de vazão da ordem de -75,86% e de produção de sedimentos da ordem de -86,5%, quando comparados os cenários, com redução significativa do aporte de sedimentos no exutório. Percebeu-se que, conforme o SDI, os anos mais críticos relacionados aos eventos de seca não foram coincidentes nos diferentes cenários abordados (pessimista e otimista). Além disso, verificou-se também a ocorrência de longos períodos de seca em todas as escalas temporais utilizadas. A matriz de transição demonstrou a alta probabilidade de ocorrência de eventos de seca ocorridos em anos sucessivos, além de demonstrar a propagação das secas nas diferentes escalas temporais (3, 6, 9 e 12 meses) em cada ano hidrológico. Espacialmente, percebeu-se uma concentração da produção de sedimentos na porção referente à nascente da BHRP. Por fim,

percebeu-se a íntima relação das ocorrências de seca hidrológica com a variação do quantitativo da produção de sedimentos em cenários futuros na BHRP.

PALAVRAS-CHAVE: Secas hidrológicas; Produção de sedimentos; SDI; SWAT.

ABSTRACT

Water availability and sediment production in semi-arid basins are influenced by climate change, among others, which poses a threat to the ecosystem and the management of water resources. It is noticed that hydrological droughts have gradually increased in severity, duration and occurrence over the years, which raises the attention of researchers about future impacts on water availability and sediment production caused by climate change. This study aims of estimating the production of sediments occurred in future hydrological drought events in the Piancó River basin, based on future climate scenarios based on the emission of greenhouse gases. The effects of future precipitation regimes on surface runoff and sediment production in a basin in the Brazilian semi-arid region were analyzed based on the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model and the Streamflow Drought Index (SDI). In this study, two future climate scenarios were analyzed, RCP 4.5 (optimistic) and RCP 8.5 (pessimistic). For the calibration of the SWAT model, the software SWAT Calibration and Uncertainty Programs (SWAT-CUP) was used, with the calibration period from 1993–2005 and the validation period from 2008–2012. After these procedures, the climate forecast data of the scenarios optimistic and pessimistic were used to obtain future time series of flow and sediment production, using the SWAT model. Then, the SDI was calculated based on the series of simulated future flows for the identification of drought events in the basin. The results of the study showed that the calibration and validation of the model presented very good adjustments: $R^2 = 0.83$ and $NSE = 0.82$ and $R^2 = 0.89$ and $NSE = 0.77$, respectively. There were reductions in flow volume of -75.86% and sediment production of -86.5%, when comparing the scenarios, with a significant reduction in the contribution of sediments to the outlet. It was noticed that, according to the SDI, the most critical years related to drought events did not coincide in the different scenarios addressed (pessimistic and optimistic). In addition, the occurrence of long periods of drought was also verified in all the time scales used. The transition matrix demonstrated the high probability of occurrence of drought events occurring in successive years, in addition to demonstrating the propagation of droughts in different time scales (3, 6, 9 and 12 months) in each hydrological year. Spatially, a concentration of sediment production was noticed in the portion referring to the source of the BHRP. Finally, the close relationship between the occurrences of hydrological drought and the variation in the quantity of sediment production in future scenarios in the BHRP was perceived.

KEYWORDS: Hydrological droughts; Sediment yield; SDI; SWAT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da BHRP no Estado da Paraíba e na região Nordeste.....	37
Figura 2 – Comportamento da precipitação média mensal na BHRP.....	38
Figura 3 – Mapa geológico da BHRP.....	39
Figura 4 – Fluxograma do processo de modelagem hidrológica a partir do modelo SWAT	43
Figura 5 – Topografia, Tipos de solo e Uso do solo da bacia hidrográfica do Rio Piancó.....	48
Figura 6 – Postos Pluviométricos da BHRP utilizados no estudo.....	49
Figura 7 – Rede de Drenagem da BHRP e localização do posto fluviométrico.....	50
Figura 8 – Resultado do processo de calibração das vazões mensais da BHRP (1993–2005)	58
Figura 9 – Resultado do processo de validação das vazões mensais da BHRP para o período de 2008–2012.....	59
Figura 10 – Produção de sedimentos da BHRP no cenário atual após a validação.....	61
Figura 11 – Regime pluviométrico nos cenários futuros RCP 4.5 e RCP 8.5 no período de 2030 – 2099.....	62
Figura 12 – Vazões futuras da BHRP de acordo com os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 (período de 2030–2099)	63
Figura 13 – SDI-3 e SDI-6 na BHRP no período de 2030–2099 no cenário otimista.....	64
Figura 14 – SDI-6 e SDI-9 na BHRP no período de 2030–2099 no cenário otimista.....	64
Figura 15 – SDI-9 e SDI-12 na BHRP no período de 2030–2099 no cenário otimista.....	65
Figura 16 – SDI-3 e SDI-6 na BHRP no período de 2030–2099 no cenário pessimista.....	66
Figura 17 – SDI-6 e SDI-9 na BHRP no período de 2030–2099 no cenário pessimista.....	66
Figura 18 – SDI-9 e SDI-12 na BHRP no período de 2030–2099 no cenário pessimista.....	67

Figura 19 – Produção de sedimentos futura da BHRP de acordo com os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 (2030–2099)	70
Figura 20 – Mapa da produção de sedimentos da BHRP, de acordo com o cenário pessimista de emissões RCP 8.5 (2030–2099)	71
Figura 21 – Mapa da produção de sedimentos da BHRP, de acordo com o cenário otimista de emissões RCP 4.5 (2030–2099).....	72
Figura 22 – Aporte de sedimentos no exutório da BHRP, de acordo com os cenários otimista (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5) de emissões de GEE (2030–2099).....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Definição dos parâmetros utilizados no gerador climático do SWAT.....	51
Tabela 2 – Classificação do desempenho de modelos hidrológicos com base no R^2 e no NSE.....	53
Tabela 3 – Parâmetros utilizados para a calibração do modelo SWAT.....	54
Tabela 4 – Classificação da seca hidrológica quanto à severidade.....	57
Tabela 5 – Parâmetros otimizados obtidos pela calibração a partir do SWAT-CUP.....	60
Tabela 6 – Número de ocorrências de eventos secos entre os anos de 2030 – 2099.....	68
Tabela 7 – Frequência de ocorrência de eventos secos entre os anos de 2030 – 2099.....	69
Tabela 8 – Matriz de transição dos eventos de seca hidrológica 2030 – 2099, referente ao cenário pessimista.....	69
Tabela 9 – Matriz de transição dos eventos de seca hidrológica 2030 – 2099, referente ao cenário otimista.....	70

LISTA DE SIGLAS

- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
- AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
- BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
- BHRP – Bacia hidrográfica do Rio Piancó
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- GEE – *Google Earth Engine*
- HRU – Unidade de Resposta Hidrológica
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- MDE – Modelo Digital de Elevação
- MODIS – *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*
- MUSLE – *Modified Universal Soil Loss Equation*
- NRCS – *Natural Resources Conservation Service*
- PHDI – *Palmer Hydrological Drought Index*
- PROJETA – Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul Regionalizadas pelo Modelo ETA
- RCP – *Representative Concentration Pathway*
- SCS – *Soil Conservation Service*
- SDI – *Streamflow Drought Index*
- SPEI – *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*
- SPI – *Standardized Precipitation Index*
- SRI – *Standardized Runoff Index*
- SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*
- SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
- SUFI 2 – *Sequential Uncertainty Fitting*
- SWAT – *Soil & Water Assessment Tool*
- SWAT CUP – *SWAT Calibration and Uncertainty Programs*

SWI – *Standardized Water Level Index*

SWSI – *Surface Water Supply Index*

USDA – *United States Department of Agriculture*

USGS – *United States Geological Survey*

VIC – *Variable Infiltration Capacity*

WEI+ – *Water Exploitation Index Plus*

WGEN – Gerador climático

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	20
2.1. OBJETIVO GERAL.....	20
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1. SECAS E A REGIÃO SEMIÁRIDA BRASILEIRA	21
3.2. CENÁRIOS CLIMÁTICOS.....	27
3.3. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS	29
3.4. MODELAGEM HIDROLÓGICA E APLICAÇÕES DO SWAT	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1. ÁREA DE ESTUDO	36
4.2. MODELAGEM HIDROLÓGICA	39
4.2.1. Delimitação da bacia hidrográfica	42
4.2.2. Uso e cobertura do solo	44
4.2.3. Tipos de Solos.....	45
4.2.4. Declividade	47
4.2.5. Gerador climático	48
4.2.6. Análise estatística do desempenho da modelagem hidrológica	52
4.2.7. Calibração e validação do modelo SWAT	53
4.3. CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS.....	55
4.4. ANÁLISE DOS EVENTOS DE SECA HIDROLÓGICA	56
5. RESULTADOS	58
5.1. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	58
5.2. VARIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS	60

5.3. SIMULAÇÃO HIDRO-METEOROLÓGICA FUTURA: ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE VAZÕES E DO CLIMA FUTURO.....	61
5.4. CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS DE SECA NOS CENÁRIOS FUTUROS	63
5.5. DINÂMICA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS REFERENTE ÀS SECAS HIDROLÓGICAS FUTURAS	70
6. CONCLUSÃO.....	74
7. REFERÊNCIAS	76
APÊNDICE A – BANCO DE DADOS DE SOLOS	89
APÊNDICE B – GERADOR CLIMÁTICO UTILIZADO (WGEN)	91

1. INTRODUÇÃO

O principal problema dos efeitos futuros de regimes de precipitação no escoamento superficial e produção de sedimentos em bacias hidrográficas da região semiárida do Brasil é a incerteza quanto às mudanças climáticas e suas implicações para a disponibilidade hídrica e a intensidade das chuvas (VIANA et al., 2021). As mudanças climáticas podem levar a uma redução da quantidade de água disponível e a mudanças na intensidade e distribuição temporal das chuvas, o que pode ocasionar impactos significativos na hidrologia e geomorfologia das bacias hidrográficas (XAVIER et al., 2020). Além disso, a falta de dados e informações precisas sobre a dinâmica da bacia e a incerteza quanto às futuras condições climáticas tornam difícil prever com precisão como os regimes de precipitação futuros afetarão o escoamento superficial e a produção de sedimentos (SANTOS et al., 2021). Assim, a realização de estudos sobre os efeitos futuros de regimes de precipitação nos processos hidrossedimentológicos em uma bacia da região semiárida do Brasil são essenciais para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Além disso, a região semiárida do Nordeste do Brasil é caracterizada por alta variabilidade de precipitação, o que afeta a disponibilidade hídrica e a produção agrícola na região (BRITO et al., 2021). Durante longos períodos de seca, a falta de chuvas pode prejudicar a agricultura e afetar a vida de comunidades rurais dependentes de fontes hídricas. Além disso, as intensas chuvas, quando ocorrem, podem causar erosão e deslizamentos de terra, prejudicando ainda mais a situação da região (DANTAS et al., 2020). Essa variação na pluviometria na região semiárida do Nordeste do Brasil representa um desafio para as comunidades locais e para o planejamento de políticas públicas que visem a garantir a segurança hídrica e a sustentabilidade da região (OLIVEIRA et al., 2022).

O estado da Paraíba está localizado no Nordeste brasileiro, em uma região de clima predominantemente semiárido, sendo uma das regiões mais vulneráveis do mundo no tocante às mudanças climáticas e à frequente ocorrência de secas (IPCC, 2014; BRASIL NETO et al., 2020). Essa região é caracterizada pela ausência de precipitações em quantidades significantes em grande parte do ano, solos rasos, embasamento cristalino, altas taxas de evaporação e poucos investimentos socioeconômicos, tornando-a uma área bastante vulnerável à escassez hídrica, sendo um dos estados brasileiros mais afetados pelas secas nos últimos decênios (MARENGO et al., 2017; DANTAS et al., 2020).

A Bacia Hidrográfica do Rio Piancó (BHRP), localizada no estado da Paraíba, representa uma área vulnerável e sensível aos efeitos das mudanças climáticas, especialmente por estar localizada na região semiárida, sendo esta importante para a realização de estudos hidrológicos, devido à sua localização estar contemplada em uma região onde a disponibilidade de água e a produção de sedimentos são bastante influenciadas pelos regimes de precipitação, sendo uma área suscetível a impactos significativos na dinâmica hídrica ocasionados pelo crescimento da severidade e ocorrência de secas hidrológicas.

As secas são fenômenos naturais extremos que correspondem ao déficit na quantidade de água disponível em um determinado sistema hidrológico (SHEFFIELD e WOOD, 2011), com capacidade de afetar grandes populações e causar perdas em diversos setores da economia, como indústria, turismo, agropecuária, produção de energia e navegação, por exemplo (SUN e ZHOU, 2020). Esses eventos extremos estão ocorrendo com maior frequência e severidade nos últimos anos, sendo consequência direta dos impactos causados pelas mudanças climáticas. A principal causa dos eventos extremos são as anomalias meteorológicas, como a distribuição irregular de precipitações, que conduzem à redução gradativa de volumes de armazenamento e de fluxos do ciclo hidrológico (NALBANTIS, 2008; OZKAYA e ZERBERG, 2019). De acordo com Wilhite et al. (2007), 22% do dano total e 3% das mortes causadas por desastres naturais em todo o mundo estão relacionadas aos eventos de seca. Além disso, dados climatológicos indicam que a atmosfera está em aquecimento, de modo que isso contribuirá negativamente no ciclo hidrológico, pois maiores temperaturas promoverão maiores taxas de evaporação, favorecendo a ocorrência de secas (LIU et al., 2017; OMER et al., 2020).

As atividades antrópicas, sobretudo a utilização de combustíveis derivados do petróleo, a exemplo da gasolina, e a desflorestação, têm promovido uma alteração bastante acentuada nas condições hidroclimatológicas do planeta, sendo previsto para o século 21 um aumento contínuo na temperatura do ar global, bem como mudanças no padrão global de precipitações (IPCC, 2007; SHUKLA et al., 2021). As mudanças climáticas, como o aumento das temperaturas, as variações no padrão pluviométrico e o incremento nas concentrações de CO₂ na atmosfera, são responsáveis por alterar o volume e o regime de vazões, a umidade do solo, a temperatura da água, entre outros aspectos do ciclo hidrológico, gerando alterações nos ecossistemas, no crescimento de vegetações, no aporte hídrico de reservatórios e na geologia, por exemplo, sendo consideradas como um dos maiores perigos a se enfrentar pelas gerações futuras e atuais. Além disso, as variações nos

padrões climatológicos possuem o potencial de aumentar a intensidade e a frequência de catástrofes ambientais, a exemplo de secas e inundações (PANDHUMAS et al., 2020; KIM et al., 2020; SHUKLA et al., 2021).

Naumann et al. (2018) estimam que, aproximadamente, dois terços da comunidade humana enfrentarão eventos hidrológicos extremos por consequência das mudanças climáticas no futuro próximo, além disso, estima-se que o déficit de abastecimento de água deve aumentar em cinco vezes até o ano de 2100 (TOUMA et al., 2015; ZENG et al., 2021). Os impactos promovidos pelas secas são observados a longo prazo e se estendem por regiões mais amplas que outros eventos climáticos extremos, a exemplo das inundações. Além disso, o potencial lesivo desse fenômeno varia nas diferentes partes do mundo, pois depende não só de características próprias da seca, como duração e severidade, mas também das vulnerabilidades locais, como utilização inapropriada do solo, uso hídrico não-racional e gestão e manejo inadequados da água (RADEVA et al., 2018). Devido a isso, estudiosos, ao redor do mundo, são levados a investigar com maior profundidade esse fenômeno climático, bem como suas medidas mitigadoras.

Durante os últimos decênios, uma gama de índices foi estabelecida com o intuito de quantificar os eventos de seca, de modo a permitir uma comparação satisfatória entre esses eventos extremos em diferentes partes do mundo. Dentre esses índices, pode-se citar o *Streamflow Drought Index* (SDI) (NALBANTIS e TSAKIRIS, 2009), que se caracteriza por ser vantajoso em relação aos outros índices de seca hidrológica em termos de eficácia nos resultados obtidos, com uma metodologia de cálculo relativamente simplificada, sendo utilizado como objeto de estudos internacionalmente (TABARI et al., 2013; OZKAYA e ZERBERG, 2019; OMER et al., 2020; SUN e ZHOU, 2020;).

A compreensão do fluxo superficial, ou seja, das vazões de uma bacia hidrográfica, é de suma importância para o estudo da produção de sedimentos, visto que o regime de vazões é responsável por alterar os padrões de transporte de sedimentos, erosão e assoreamento no leito dos rios. De acordo com Li et al. (2020), durante as últimas décadas, ocorreram alterações significativas no fluxo de sedimentos em 40% dos grandes rios do mundo, afetando a disponibilidade hídrica e a qualidade da água das regiões. Porém, assim como ocorre com os dados fluviométricos, medições referentes à produção de sedimentos são bastante raras, por serem difíceis e onerosas (RICCI et al., 2019). Diante disso, os modelos hidrológicos se constituem como uma ferramenta bastante valiosa por permitirem a geração de longas séries de escoamento superficial e de produção de sedimentos para

utilizações em diversos estudos ambientais que necessitam desses tipos de dados, como a análise das secas hidrológicas associada com produção de sedimentos, por exemplo.

Entre os modelos hidrológicos amplamente consolidados na literatura internacional, pode-se citar o *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT) (ARNOLD et al., 1998), criado com o objetivo de predizer a influência ocasionada pelas práticas de manejo do solo, sedimentos e agroquímicos nos corpos hídricos, para longos períodos de estudo, o qual utiliza como escala de referência a bacia hidrográfica, possuindo a característica de ser computacionalmente eficiente (NEITCSH et al., 2011). Esse modelo hidrológico é considerado o modelo com base em processos mais popular na comunidade científica, sendo um dos mais adequados para a simulação de processos hidrológicos superficiais e subterrâneos, possuindo grande aplicabilidade na avaliação da influência das alterações climáticas e das atividades antrópicas sobre vazões e produção de sedimentos (RODRIGUES et al., 2019; LI Y. et al., 2020; LÓPEZ-BALLESTEROS et al., 2020; YE et al., 2020).

Diante disso, utilizar cenários climáticos futuros se constitui em uma ferramenta valiosa, visando a estimar os impactos causados pelas mudanças climáticas nas diferentes fases do ciclo hidrológico, pois torna possível predizer como uma sociedade será afetada em termos físicos e econômicos por alterações nas variáveis climáticas, avaliando o potencial lesivo desses impactos ao se comparar, por exemplo, os resultados entre cenários otimistas e pessimistas. Permite também aos gestores a realização de planejamento antecipado, de forma que haja adaptação da comunidade a essas mudanças e também que seja promovida a mitigação dos efeitos de eventos extremos, como a escassez hídrica, por medidas como a construção e ampliação de reservatórios, perfuração de poços e disponibilização de caminhões-pipa para a comunidade. Cenários descritores de clima futuro ajudam na compreensão das implicações futuras no manejo dos recursos hídricos e, com isso, são capazes de reduzir a vulnerabilidade futura de populações que habitam, principalmente, em áreas de estresse hídrico (KLEIN et al., 2007; CGEE, 2014).

Logo, percebe-se que o estudo do futuro hidrológico de bacias de clima semiárido, como a BHRP, é importante, pois, por serem áreas bastante influenciadas pelas mudanças climáticas, o desconhecimento da hidrologia futura representa uma ameaça ao ecossistema e ao gerenciamento dos recursos hídricos nessas regiões. A compreensão da dinâmica hídrica futura possibilita a tomada de decisões baseadas em informações robustas, permitindo a implementação de medidas de gestão eficientes dos recursos hídricos, sendo fundamental para garantir a sustentabilidade econômica, social e ambiental na região.

Portanto, este estudo tem a contribuição de estimar a produção de sedimentos e a disponibilidade hídrica futura na BHRP, com base em cenários climáticos futuros, fornecendo detalhamentos sobre os impactos dessas mudanças nos recursos hídricos da região e na produção de sedimentos. Além disso, o estudo também contribui para o conhecimento sobre os efeitos das secas hidrológicas na produção de sedimentos em bacias semiáridas e ajuda a identificar as áreas mais vulneráveis às mudanças climáticas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Estimar o escoamento superficial e a produção de sedimentos ocorridos em eventos de seca hidrológica futuros na bacia hidrográfica do Rio Piancó, com base em cenários climáticos futuros baseados na emissão de gases do efeito estufa.

2.2. Objetivos Específicos

- a) Realizar a simulação hidrológica das séries de escoamento superficial e de produção de sedimentos para o período de 2030–2099, em cenários pessimista e otimista, com base no modelo *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT) para a Bacia Hidrográfica do Rio Piancó;
- b) Caracterizar os eventos de seca hidrológica nas escalas de 3, 6, 9 e 12 meses no período de 2030–2099 em cenários pessimista e otimista, com base no índice de seca SDI, quanto à severidade e frequência na bacia hidrográfica em estudo;
- c) Identificar a ocorrência de períodos críticos em relação às secas hidrológicas nos cenários em estudo;
- d) Analisar as diferenças causadas a partir dos diferentes cenários climáticos futuros no escoamento superficial e na produção de sedimentos.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Secas e a região semiárida brasileira

Seca é o fenômeno natural que se caracteriza pela diminuição expressiva da quantidade de água disponível, por um período de tempo significante para a região em estudo, e se estende por uma grande área (NALBANTIS e TSAKIRIS, 2009; SARDOU e BAHRAMAND, 2014; GAO e ZHANG, 2016). Existem quatro categorias primárias para classificação das secas, a saber: secas meteorológicas, agrícolas, hidrológicas e socioeconômicas, a depender da abordagem utilizada na quantificação de suas consequências para o ciclo hidrológico e para a sociedade, sendo as três primeiras classificações relacionadas aos aspectos físicos do fenômeno, enquanto que a última se refere às questões de oferta e demanda dos recursos hídricos e ao impacto da baixa disponibilidade hídrica no âmbito socioeconômico (WILHITE e GLANTZ, 1985).

As secas meteorológicas são caracterizadas por apresentarem um extenso período de déficit de precipitação, geralmente de um a três meses, e estão bastante relacionadas com os outros tipos de secas, sendo consideradas como o estágio inicial das outras (HANNAFORD et al., 2011). Como as condições meteorológicas que resultam no declínio da quantidade de precipitação são muito variadas ao redor do mundo, a definição de seca meteorológica é particular para cada região em estudo, pois um evento considerado extremamente seco para um local, pode não o ser para outro, por exemplo (WILHITE e GLANTZ, 1985).

Quando a seca meteorológica se prolonga por um maior período, associada com a evapotranspiração e a necessidade hídrica de culturas vegetais, ocorre o desequilíbrio da disponibilidade hídrica no solo, ou seja, desequilíbrio na umidade do solo, impactando negativamente a agricultura. Esse impacto causado nas atividades agrícolas pela baixa disponibilidade hídrica é o que caracteriza o fenômeno da seca agrícola, causando grandes perdas de produção e, consequentemente, enormes prejuízos econômicos. A ocorrência desse tipo de seca e o seu potencial lesivo dependem não só das condições meteorológicas, mas também das próprias características específicas da plantação, a exemplo do estágio de desenvolvimento que a vegetação se encontra e das propriedades físico-biológicas do solo.

A seca hidrológica, por sua vez, é caracterizada como a significativa redução quantitativa dos recursos hídricos na fase terrestre do ciclo hidrológico, como por exemplo,

diminuição das vazões dos rios, dos volumes dos reservatórios e dos níveis de água subterrânea (SUN e ZHOU, 2020). Esse tipo de seca ocorre quando o déficit de precipitação se propaga para os níveis de água superficial e subsuperficial, mas também é bastante influenciado pelas atividades antrópicas, como uso industrial, agropecuária e abastecimento humano, resultando em consequências negativas para a sociedade, como escassez hídrica, redução significativa da qualidade da água, intensificação de conflitos por recursos hídricos, aumento da mortalidade, depreciação de ecossistemas e comprometimento da economia (VAN LOON e LAAHA, 2015). Esse tipo de seca ocorre, geralmente, defasado no tempo em relação às meteorológicas e agrícolas, visto que é necessário um maior período para que os problemas ocasionados pelos déficits de precipitação sejam manifestados nas demais fases do ciclo hidrológico (WILHITE e GLANTZ, 1985).

Por fim, as secas socioeconômicas ocorrem quando a baixa disponibilidade hídrica começa a afetar a sociedade em relação à oferta e à demanda de bens econômicos (HAYES et al., 2011). Esse tipo de seca incorpora características também dos outros tipos, sendo considerada como o resultado negativo sofrido pela população em decorrência das secas (WILHITE e GLANTZ, 1985). Zhao et al. (2020) destacam que os Estados Unidos da América perderam uma quantia de aproximadamente 9 bilhões de dólares por ano em decorrência das secas nos últimos anos, sendo esse fato recorrente em todo o mundo. Pandhumas et al. (2020) relatam também que as secas em países como a Tailândia estão exacerbando a escassez hídrica e promovendo uma retração na economia, o que prejudica grandemente a vida da população local.

Além disso, percebe-se que os efeitos socioeconômicos das secas podem ser bastante potencializados pelas atividades humanas e possuírem resultados mais intensos em regiões que já possuem vulnerabilidades como pobreza e baixo desenvolvimento humano, por exemplo. A propagação de uma seca ocorre de maneira diferente a depender do clima e de outras características físicas de uma região, como relevo e tipo de solo, por exemplo. Portanto, torna-se importante caracterizar as secas quanto aos seus atributos, para a realização de estudos mais detalhados e quantificação de seus impactos em diferentes partes do mundo.

As secas podem ser caracterizadas quanto à sua frequência, severidade, período de início e duração, intensidade e área de extensão (NALBANTIS, 2008). A frequência das

secas corresponde ao número de ocorrências de eventos secos em determinado período de estudo, sendo um importante atributo para saber com qual recorrência uma região é acometida por secas. Já a severidade das secas é utilizada para quantificar o potencial lesivo de um evento de seca, variando de leve a extremo, permitindo a comparação das ocorrências de secas em diferentes regiões e períodos. A duração da seca é definida como o período entre o início e o término de um evento, durante o qual o índice de seca está continuamente abaixo de um determinado limiar. A intensidade das secas, por sua vez, corresponde à relação entre a severidade do evento e sua duração, proporcionando a análise de picos nas séries temporais de secas, de modo a auxiliar a compreensão dos impactos desses fenômenos em diferentes escalas temporais. Por fim, o reconhecimento da área de extensão possibilita a identificação de regiões críticas e a demarcação da propagação espacial de cada evento.

É importante ressaltar que a classificação das secas quanto à área de extensão não é interessante no tocante às secas hidrológicas, visto que os locais onde são coletados os dados de vazão, como os exultórios de bacias hidrográficas, por exemplo, correspondem a locais pontuais no espaço que representam de forma integrada o escoamento superficial de uma bacia hidrográfica. Portanto, as secas hidrológicas são estudadas em escala de bacia hidrográfica, sendo essa escala também a mais apropriada para a aplicação de práticas de preservação e planejamento do uso dos recursos hídricos (NALBANTIS e TSAKIRIS, 2009).

Em relação ao monitoramento e previsão de fenômenos de secas, foram desenvolvidos, ao longo dos anos, inúmeros índices que se utilizam de dados relacionados à hidrologia da região, como: dados de chuva, de evapotranspiração, de umidade do solo e de vazões, por exemplo, com o objetivo de quantificar os impactos desses fenômenos críticos nas diversas partes do planeta. Esses índices são o método mais simples de se monitorar as secas, pois demonstram de forma quantitativa o grau de severidade de um fenômeno de seca, sendo classificados em meteorológicos, hidrológicos ou agrícolas, a depender do tipo de dado requerido para seu cálculo, como, por exemplo: vazão, precipitação e umidade do solo (OZKAYA e ZERBERG, 2019).

Em relação às secas hidrológicas, pode-se citar os índices: (a) *Palmer Hydrological Drought Index* (PHDI) (PALMER, 1965), desenvolvido para mensurar os impactos da seca hidrológica nos níveis de água subterrânea e reservatórios; (b) *Surface Water Supply Index* (SWSI) (SHAFER e DEZMAN, 1982), que incorpora em sua metodologia de cálculo múltiplos componentes hidroclimatológicos e é aplicado principalmente em regiões que

possuem escoamento proveniente de derretimento de neve; (c) *Standardized Water Level Index* (SWI) (BHUIYAN, 2004), desenvolvido para mensurar o déficit de recarga das águas subterrâneas; (d) *Standardized Runoff Index* (SRI) (SHUKLA e WOOD, 2008), o qual determina os eventos de secas hidrológicas, com base no desvio do escoamento superficial acumulado em períodos especificados, como por exemplo, acumulados mensais; e, por fim, (e) *Streamflow Drought Index* (SDI), desenvolvido por Nalbantis e Tsakiris (2009), que foi concebido para fins de caracterizar as secas hidrológicas de uma região nas escalas temporais de 3, 6, 9 e 12 meses para cada ano hidrológico

Por serem fenômenos que se desenvolvem gradualmente e são identificados apenas após um certo período após o seu início, a escala de tempo utilizada para o estudo de secas não deve ser muito pequena, sendo aconselhado, nesses casos, escalas não inferiores à mensal (NALBANTIS e TSAKIRIS, 2009). O SDI utiliza séries de dados mensais de vazão $Q_{i,j}$, sendo i correspondente ao ano hidrológico e j ao mês do respectivo ano hidrológico. O processo metodológico desse índice consiste em calcular os volumes de vazão acumulados para cada escala temporal em cada ano hidrológico estudado, após isso, obtém-se o valor do $SDI_{i,k}$, onde k corresponde à escala temporal, variando de 1 a 4, ou seja, 3, 6, 9 e 12 meses, respectivamente. O valor do índice é obtido pela relação entre o volume acumulado de vazões naquele ano e escala, o volume médio e o desvio-padrão de vazões para a escala temporal específica.

Um evento de seca hidrológica pode ser classificado, de acordo com o SDI, em 5 classes: levemente seco, moderado, severo e extremo, quando o valor do índice é negativo, e condições úmidas para valores positivos. Além disso, os autores adotaram arbitrariamente a condição de seca extrema em casos de rios intermitentes e efêmeros que apresentem anos hidrológicos inteiros com vazões nulas.

Esse índice se caracteriza por: (a) possuir um custo computacional relativamente baixo; (b) ser facilmente implementado e compreendido; (c) possuir significado físico; (d) ser sensível a uma ampla gama de variação de condições de secas; (e) ser aplicável em qualquer área de estudo; (f) ser capaz de identificar os fenômenos de secas com curta defasagem após a sua ocorrência; (g) ser baseado em dados de vazão, os quais são relativamente fáceis de se obter; e (h) realizar uma caracterização da seca de forma simplificada, de acordo com a relação severidade *versus* frequência, pois a problemática relacionada a definição do momento inicial e final, bem como da duração das secas hidrológicas, é solucionada, ao se utilizar como base os períodos de referência de 3, 6, 9 e 12 meses.

Além disso, esse índice destaca-se como vantajoso em relação aos demais por possuir a simplicidade e eficiência encontrada nas metodologias de cálculo de índices meteorológicos como o *Standardized Precipitation Index* (SPI) (McKEE et al., 1993), diferentemente dos outros índices que demandam muitos dados de entrada e alto custo computacional, como o PHDI e o SWSI, por exemplo (NALBANTIS, 2008; NALBANTIS e TSAKIRIS, 2009). Apesar de que a obtenção de longas séries temporais de dados fluviométricos possa ser um obstáculo em muitas regiões do planeta, esse problema é resolvido de maneira relativamente simples pela realização de modelagens hidrológicas, portanto, o método permanece eficiente e vantajoso mesmo em locais que não possuam um monitoramento de vazões significativo.

Nalbantis (2008) realizou a validação da metodologia de cálculo do índice SDI para o estudo de secas hidrológicas ao aplicar o método nas séries de vazão mensais de duas bacias hidrográficas localizadas na Grécia, as quais abastecem a região metropolitana de Atenas e possuem regimes hidrológicos distintos. O autor concluiu que o índice foi capaz de determinar a ocorrência dos principais episódios de seca conhecidos que ocorreram nas regiões estudadas, além de ser uma boa ferramenta para prever a ocorrência de secas em cada ano hidrológico a partir de matrizes de transição modeladas utilizando cadeias de Markov. Sendo assim, o método tornou possível, por exemplo, prever o quanto provável seria a ocorrência de condições secas e sua respectiva severidade nas escalas temporais de 6, 9 ou 12 meses ao se conhecer os valores de SDI nas escalas anteriores.

Ozkaya e Zerberg (2019) avaliaram os eventos de secas hidrológicas na região da Bacia do Rio Tigris (Turquia), com base no SDI de 3, 6 e 12 meses, utilizando longas séries de vazões mensais (1972–2011) de 47 estações fluviométricas. Os autores avaliaram com base no SDI-3 (Outubro–Dezembro) que, até o ano de 1999, nenhuma das estações experienciou secas severas ou extremas, porém, após esse período, todas as estações apresentaram, no mínimo, 1 evento de seca severa, ocorrendo, em determinados anos, eventos extremos, sendo os eventos de seca moderados uma tendência geral. Os autores constataram também que os anos de 1999–2001 e 2008 foram os mais secos da região, levando em consideração o SDI-12, e que a frequência e a duração das secas se intensificaram na região com o passar das décadas.

Sun e Zhou (2020) propuseram um modelo para avaliar o risco de ocorrência de secas hidrológicas, de acordo com o SDI, e para quantificar a escassez hídrica, com base no índice *Water Exploitation Index Plus* (WEI+), associando os cenários de clima (RCP 4.5 e RCP 8.5) e de consumo hídrico futuros no período de 2020–2099. Para isso, os

autores simularam as vazões futuras a partir do modelo hidrológico semi-distribuído *Variable Infiltration Capacity* (VIC) (LIANG et al., 1994), possuindo como área estudada a Bacia do Rio Jinghe, localizada na China. Os autores constataram que o volume de precipitação nos cenários climáticos futuros foi mais elevado que o atual, o que conduziu a uma redução na frequência e na severidade das secas hidrológicas na região quando comparado com a realidade atual. No entanto, ao se analisar o WEI+, verificou-se que a escassez hídrica tenderá a aumentar nos cenários futuros, mesmo com a maior disponibilidade de água, visto que os padrões econômicos e industriais projetados demandarão uma grande quantidade de recursos hídricos, concluindo-se que, ao final deste século, a região poderá experientar uma grave escassez hídrica tanto no cenário climático otimista quanto no pessimista.

Lescesen et al. (2020) investigaram a ocorrência, frequência e a severidade dos eventos de secas hidrológicas, com base no SDI-12 e no SDI-3 para cada estação do ano, na bacia internacional do Rio Tisza, a qual compreende a Sérvia, a Hungria, a Romênia, a Eslováquia e a Ucrânia, utilizando longas séries (1964–2018) de vazões mensais de 4 postos fluviométricos. Os autores também analisaram a série de SDI, de modo a verificar se existia uma tendência na série, com base no teste de Mann-Kendall, porém observou-se, em relação ao SDI, somente uma tendência decrescente, no período do verão, em 2 dos postos estudados, devido à redução de precipitação e aumento de consumo hídrico nessa estação do ano, não sendo identificada nenhuma outra tendência estatisticamente significante nas demais estações. Ainda em relação às estações do ano, concluiu-se que a primavera foi a mais úmida e aquela que apresentou maiores variações dos valores de SDI ($4 < \Delta\text{SDI} < 5$) e que o SDI apresentou valores negativos principalmente no inverno e no verão. Verificou-se, também, que ocorreram dois longos períodos de seca na região, entre 1983–1993 e 2011–2015, sendo cinco eventos severos, dois extremos e os demais entre moderados e leves.

Por fim, conclui-se que o índice SDI possui uma metodologia bastante consolidada na literatura, com diversos estudos que demonstram sua confiabilidade na representação dos eventos de secas hidrológicas, sendo implementado em diferentes regiões do mundo, como Ásia (ZHAO et al., 2019; PANDHUMAS et al., 2020; OMER et al., 2020), América (MADADGAR e MORADKHANI, 2013; DJEBOU, 2019; ZHAO et al., 2020), África (BOUDAD et al., 2018) e Europa (RADEVA et al., 2018), por exemplo.

3.2. Cenários climáticos

A estimativa dos impactos das mudanças climáticas, em escala de bacia hidrográfica, é essencial para a realização do manejo e gerenciamento dos recursos hídricos, tendo em vista que as características de cada área de estudo podem influenciar na potencialidade dos efeitos dessas mudanças (ESHETE et al., 2022; REDDY et al., 2017), as quais influenciam na disponibilidade hídrica, na produção de energia, na irrigação, na agropecuária, entre outros. Sharannya et al. (2018) ressaltam a influência das alterações nos padrões climáticos no escoamento superficial de uma bacia e reforçam que essa influência pode ser bem mensurada a partir de modelos hidrológicos como o modelo SWAT.

As mudanças climáticas alteram o montante de água na atmosfera, bem como os padrões de precipitação, como, por exemplo, sua frequência e intensidade, assim como aumentam as taxas de evaporação, ocasionando problemas na capacidade de obtenção hídrica de uma bacia hidrográfica, aumentando a escassez e o estresse hídrico (ORKODJO et al., 2022; ARNELL et al., 2013; ALLANI, 2011; BATES et al., 2008). Portanto, percebe-se que as alterações climáticas são capazes de aumentar a frequência e a intensidade de eventos extremos, a exemplo das secas e inundações. Orkodjo et al. (2022) destacam que, nas últimas décadas, os efeitos das mudanças climáticas tornaram-se mais perceptíveis local e globalmente, ocasionados, principalmente, pelos aumentos das temperaturas médias, decorrentes das emissões de gases do efeito estufa. Devido a isso, torna-se de suma importância analisar os impactos ocorridos no ciclo hidrológico, em escala de bacia hidrográfica, a partir de cenários climáticos futuros de emissões de gases do efeito estufa, sobretudo em regiões que já apresentam deficiências hídricas, como o semiárido nordestino.

Ho et al. (2022) analisaram as tendências históricas nos coeficientes de escoamento superficial, decorrentes de eventos de inundaçāo, bem como o impacto das mudanças climáticas na resposta do escoamento superficial, a partir da precipitação máxima anual correspondente a 3 dias, utilizando dados de postos pluviométricos e fluviométricos, em relação a 467 bacias hidrográficas na Austrália, as quais abrangem regiões de clima árido, temperado e tropical. Os autores utilizaram o modelo semi-distribuído AWRA-L, o qual representa as reservas de água na superfície, camadas rasas e profundas do solo, para avaliar as respostas do escoamento superficial sob diferentes cenários climáticos futuros (RCP 4.5 e RCP 8.5). O modelo foi validado a partir de dados climatológicos, de modo a

garantir que os dados projetados se ajustavam à realidade da área de estudo. Os autores observaram que o volume de escoamento superficial esperado em relação a dado volume de precipitação tenderá a diminuir, por ocasião das alterações climáticas, na porção sul da Austrália, em ambos os cenários de emissão de gases do efeito estufa abordados (RCP 4.5 e RCP 8.5), no período de 2050–2085. De modo análogo, também foi observada diminuição do volume de escoamento na porção nordeste, em relação ao cenário RCP 4.5, o que, segundo os autores, contraria os padrões de tendência da região. Por fim, os autores concluíram que, em relação à área de estudo, o volume total precipitado que é efetivamente convertido em escoamento superficial tem diminuído em locais de média latitude, enquanto que observa-se aumento nas regiões tropicais.

Eshete et al. (2022) estudaram o impacto ocasionado pelas mudanças climáticas nas vazões da bacia do Rio Megech, Etiópia, a partir dos seguintes modelos de circulação globais: *Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis* (CanMES2), *Model for Interdisciplinary Research on Climate* (MIROC), *Institute Pierre Simon Laplace* (IPSL) e *Max Planck Institute for Meteorology* (MPI). Os autores se utilizaram do modelo SWAT para a modelagem das vazões em cenários climáticos futuros nas décadas de 2050 e 2080, utilizando como referência o período de 1976–2005, para a calibração e validação do modelo, os quais apresentaram coeficientes de eficiência de Nash–Sutcliffe de 0,74 e 0,68, respectivamente. Os resultados mostraram que houve aumento nas temperaturas médias e redução nas precipitações, tanto no cenário de emissões de GEE RCP 4.5, quanto no RCP 8.5, sendo estimado um aumento de 1,9 °C na temperatura média anual e uma redução de 7,9% do total precipitado ao final do século. Além disso, foi observado que, no verão (estação úmida), a bacia tenderá a se tornar mais quente e mais úmida. Em relação às vazões futuras, os resultados mostraram que, para o cenário RCP 4.5 é previsto um aumento de 5,9% e 6,5% para os anos de 2050 e 2080, respectivamente, enquanto que, no cenário RCP 8.5, espera-se um aumento de 7,3% em 2050 e 8,3% em 2080. Por fim, os autores ressaltaram a eficiência do modelo SWAT em captar os impactos das mudanças climáticas, em cenários futuros de emissões de GEE, na dinâmica do escoamento superficial da bacia hidrográfica em estudo.

Heidarizadi et al. (2022) realizaram o estudo das mudanças climáticas a partir de dois índices de aridez (o Índice de Aridez de De Martonne e o Índice de Aridez de Emberger) em cenários climáticos futuros, correspondentes aos períodos dos anos 2020, 2050 e 2080, a partir dos cenários de emissões de GEE RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5, utilizando para simulação dos cenários o modelo de circulação global *Canadian Earth*

System Model (CanESM2), com área de estudo correspondente à planície de Gorgan, no Irã. Os autores observaram uma tendência crescente nas temperaturas médias, em todos os horizontes futuros, para todos os cenários RCP utilizados, sendo o cenário RCP 8.5 o mais crítico, com aumento de 5,5 °C na temperatura média anual para a década de 2080. A precipitação média apresentou diminuição nos cenários futuros, sobretudo no verão, atingindo o percentual de 43,3% de redução no cenário RCP 4.5. De acordo com o Índice de Aridez De Martonne, a área de estudo classifica-se como árida ou semi-árida em todos os cenários climáticos futuros analisados, sendo o período de Abril–Outubro os meses com maior grau de aridez.

Orkodjo et al. (2022) estudaram os impactos ocasionados pelas mudanças climáticas na disponibilidade hídrica para irrigação e geração de energia hidroelétrica na bacia do Rio Omo-Gibe, na Etiópia, a partir de diferentes cenários climáticos futuros (RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 e RCP 2.6), em três diferentes períodos: 2017–2044 (curto prazo), 2045–2072 (médio prazo) e 2073–2100 (longo prazo). Os autores basearam o estudo em dois modelos para a modelagem hidrológica: o modelo SWAT para realizar a simulação das vazões da bacia e sua respectiva disponibilidade hídrica (utilizando os períodos de 1997–2012 para calibração e 2013–2019 para validação) e o modelo WEAP para estimar a demanda e alocação hídricas futuras (2001–2013 e 2014–2019, para calibração e validação, respectivamente). Concluiu-se que a temperatura média aumentará entre 2,10 – 3,55 °C, no cenário RCP 4.5, e entre 2,7 – 4,75 °C, no cenário RCP 8.5. Em relação à precipitação, observou-se uma tendência de redução entre 9,5% – 12,6% e 11,1% – 13,86%, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente. Por fim, em relação às vazões médias anuais, os autores estimaram reduções de 7,0% – 10,9%, no cenário RCP 4.5, e 10,9% – 12,8%, no cenário RCP 8.5. Estimou-se que a escassez hídrica na região aumentará em torno de 8,0% – 25,1%, sobretudo na estação quente e seca que ocorre entre novembro e março, afetando em até 25,4% e 20,2% a disponibilidade hídrica para irrigação e geração de energia hidroelétrica, respectivamente.

3.3. Produção de sedimentos

A erosão do solo se trata de um grave problema em relação aos recursos hídricos, tendo em vista o seu potencial de afetar negativamente a qualidade da água, sendo causada por fatores hidrológicos, climáticos, topográficos, antropogênicos, bem como fatores

relacionados aos tipos de solos e aos diferentes usos e coberturas dos solos (NAGIREDDY et al., 2022; LIU et al., 2019; PANDA et al., 2021). Além disso, a erosão dos solos é capaz de causar a degradação dos solos e a redução de sua fertilidade, o que afeta a capacidade de produção de bens econômicos, prejudicando a população que depende socioeconomicamente da agricultura, aumentando a insegurança alimentar e reduzindo a qualidade de vida (ABEBE et al., 2022; ASMAMAW et al., 2019; HAILE et al., 2012).

A erosão hídrica dos solos é considerada como a responsável por 55% de toda a área de solos degradados do planeta (ABEBE et al., 2022; TAMENE e VLEK, 2008). Porém, a erosão dos solos e a produção de sedimentos não se distribuem de forma homogênea em uma bacia hidrográfica, por isso é de suma importância a realização de estudos em escala de sub-bacias, utilizando modelagem hidrossedimentológica, para se ter uma compreensão mais sistêmica desses fenômenos (NAGIREDDY et al., 2022).

Sadhwani et al. (2022) estudaram os efeitos causados por cenários futuros de uso e cobertura do solo no escoamento superficial e na produção de sedimentos, utilizando modelagem hidrológica a partir do modelo SWAT, na região da Bacia Hidrográfica do Rio Periyar, localizada na Índia, com horizonte de estudo de 1988 a 2100. O uso e cobertura do solo foi estimado para os anos de 2030, 2050, 2075 e 2100, de acordo com o método das cadeias de Markov, utilizando o software TerrSET. Estimou-se que, no ano de 2100, a área urbana terá um crescimento de 16,45%, ao passo que áreas verdes diminuirão em 13,7%. Em relação à vazão e à produção de sedimentos, percebeu-se haver pouca influência das mudanças de uso e cobertura do solo no exutório da bacia hidrográfica. No entanto, em nível de sub-bacias, verificou-se variações de 70% e 200%, em relação ao escoamento superficial e à produção de sedimentos, respectivamente. Verificou-se, por fim, que outros parâmetros, além do uso e cobertura do solo, influenciam na dinâmica de sedimentos e vazões da bacia, como declividade e tipo de solo, por exemplo.

Karakoyun et al. (2022) propuseram estimativas de vazões, produção de sedimentos e áreas propensas à erosão na Bacia Hidrográfica do Rio Murat, a partir de modelagem hidrológica com o modelo SWAT, utilizando como base os dados observados de vazão e produção de sedimentos a partir de duas estações de medição. Os autores observaram que as condições de erodibilidade são mais críticas em regiões com declividade superior a 25% e identificaram grandes aumentos na vazão e produção de sedimentos nos meses de março a maio, os quais são contemplados pela estação úmida, sendo os picos da produção de

sedimentos e da vazão em maio, precedidos do pico de precipitação em abril, tendo os autores sugerido que, na produção de sedimentos, a vazão é um fator de influência mais eficiente do que a precipitação. Em relação à erodibilidade, os autores identificaram que 3,9% da bacia estava sob condições de erosão muito severa, enquanto que 21,3% estava sob condições severas, possuindo ainda 31,3% e 43% sob condições moderadas e leves, respectivamente. A produção de sedimentos mostrou-se mais expressiva na região do baixo curso da bacia estudada, e, por fim, os autores identificaram que as sub-bacias com altas taxas de escoamento superficial são as mesmas com elevados valores de produção de sedimentos, tendo concluído que o escoamento superficial é um dos principais fatores geradores de produção de sedimentos e que o modelo SWAT consiste em uma ferramenta satisfatória para simulações de vazão e produção de sedimentos.

Abebe et al. (2022) realizaram modelagem hidrossedimentológica para estimativa da produção de sedimentos e para identificação de áreas propensas à erosão em bacia hidrográfica com dados escassos, localizada na Etiópia, utilizando o modelo SWAT. Na pesquisa, foram utilizados dados observados de concentração de sedimentos em suspensão, os quais foram utilizados para calibração e validação do modelo. De acordo com o modelo SWAT, os índices estatísticos referentes à modelagem da produção de sedimentos apresentaram desempenho muito bons, sendo R^2 e NSE, respectivamente, 0,79 e 0,72, para o período de calibração e 0,70 e 0,66, para o período de validação. Os autores constataram, pelo índice estatístico PBIAS, que a produção de sedimentos modelada foi superestimada nos picos, quando comparada com os dados observados. No entanto, de modo geral, a estimativa da produção de sedimentos simulada obteve alta acurácia com os dados observados. Os autores observaram a alta produção de sedimentos nos meses chuvosos, sendo 80% do total anual ocorrido entre os meses de junho a setembro, no horizonte de estudo de 1992 a 2020, sendo a média anual da produção de sedimentos estimada de 17,9 toneladas por hectare por ano. Os autores observaram que a produção de sedimentos é bastante influenciada pelas chuvas e pelo escoamento superficial, ressaltando que a correlação com o escoamento superficial ($R^2 = 0,98$) é mais forte do que com as chuvas ($R^2 = 0,62$). Por fim, os autores concluíram que o modelo SWAT é capaz de estimar diversos componentes do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica com confiabilidade e que, na região em estudo, as áreas cultivadas com grande declividade são as mais propensas à erosão.

Nagireddy et al. (2022) utilizaram o modelo SWAT para analisar a distribuição espacial da produção de sedimentos em duas bacias hidrográficas localizadas na Índia: Bacia Hidrográfica do Rio Nagavali e Bacia Hidrográfica do Rio Vamsadhara, utilizando dados observados, no período de 1991 a 2014, de vazão e produção de sedimentos a partir de duas estações de medições, sendo uma estação para cada bacia em estudo. As sub-bacias em estudo foram divididas em 3 classes, de acordo com a média anual de produção de sedimentos, sendo leve, quando abaixo de 5 ton/ha/ano, moderada, quando contabilizado entre 5 e 10 ton/ha/ano e, por fim, valores maiores que 10 ton/ha/ano são classificados como alta erosão. As modelagens indicaram produções de sedimentos médias anuais de 7,18 ton/ha/ano para a bacia do rio Nagavali e 10,7 ton/ha/ano para a bacia do rio Vamsadhara, classificando-as em classes de moderada e alta erosão, respectivamente. Na bacia do rio Nagavali, 26,5% da bacia corresponde a área de alta erosão, sendo esse valor de 49% para a bacia do rio Vamsadhara.

3.4. Modelagem Hidrológica e aplicações do SWAT

A modelagem hidrológica é a principal ferramenta utilizada para se analisar a sistemática no tocante à hidrologia de uma bacia hidrográfica, bem como os impactos nos recursos hídricos causados pelas mudanças climáticas e atividades antrópicas (PARAJULI, 2010; BLANCO-GÓMEZ et al., 2019). Nesse sentido, os modelos hidrológicos consistem em um consolidado de equações com base matemática, as quais são utilizadas com o fim de se obter esclarecimentos sobre como ocorre a dinâmica hídrica das bacias hidrográficas (BRIGHENTI, 2015). A evolução da tecnologia, nas últimas décadas, promoveu o desenvolvimento de computadores com velocidade de processamento, capacidade de armazenamento e infraestrutura operacional mais eficientes, o que proporcionou a criação de diversos modelos hidrológicos, sendo estes aplicados em estudos sobre bacias hidrográficas internacionalmente (ARNOLD et al., 1998; TANG et al., 2019).

Os modelos hidrológicos são categorizados, no tocante à distribuição espacial, em pontuais ou distribuídos. Os modelos pontuais consideram a bacia hidrográfica como uma área de características homogêneas, ou seja, as variáveis espaciais são iguais para todos os pontos da bacia. Os modelos distribuídos, por sua vez, consideram a heterogeneidade das características das bacias hidrográficas, ou seja, consideram as variações das características distribuídas espacialmente na área de estudo, originando múltiplas sub-bacias, a partir da

divisão da bacia hidrográfica em estudo, com base na classe, uso e ocupação do solo e na topografia, por exemplo, para que a simulação seja realizado com maior fidelidade em relação aos fenômenos hídricos nas diferentes partes da região estudada (TANG et al., 2019). Segundo Beven (1991), os processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica são melhores evidenciados quando são utilizados os modelos do tipo distribuídos, sendo esses mais adequados para analisar as interações entre esses processos e para simular alterações na dinâmica da bacia hidrográfica, como mudanças climáticas e no uso e ocupação do solo, por exemplo.

Em relação à caracterização temporal dos dados, existem duas categorias possíveis de classificação dos modelos hidrológicos: discretos ou contínuos. Nos modelos discretos, a representação do fenômeno hidrológico ocorre em períodos isolados da série temporal, enquanto os contínuos representam longas séries temporais, contemplando a variação dos processos físicos da bacia hidrográfica no tempo, simulando com maior exatidão as fases do ciclo hidrológico. Por fim, em relação à descrição dos processos, os modelos hidrológicos podem ser qualificados em empíricos ou conceituais. Os modelos no qual são utilizadas funções baseadas em análises estatísticas, de modo a não apresentar relação direta com os processos físicos envolvidos no fenômeno estudado, são denominados empíricos, enquanto que os modelos conceituais se baseiam nas representações desses processos, podendo ser semi-conceitual, quando os parâmetros possuem uma margem de empirismo, ou de base física, quando os parâmetros se aproximam suficientemente da física do sistema e são utilizadas equações do sistema físico para a representação dos processos (MARINHO FILHO et al., 2012).

O SWAT é classificado como um modelo hidrológico semi-distribuído, contínuo e conceitual de base física, apto a simular a sistemática física de uma bacia hidrográfica, utilizando-a como escala de referência. Esse modelo foi criado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) com o objetivo de avaliar a influência de diferentes práticas de utilização do solo no escoamento superficial, na produção de sedimentos e nos agroquímicos (ARNOLD e FOHRER, 2005). Nesse modelo hidrológico, a bacia hidrográfica é discretizada, tomando por base a topografia da região, bem como o caminho natural do fluxo de sua rede de drenagem, gerando a divisão em diversas sub-bacias, as quais, por sua vez, são fragmentadas em Unidades de Resposta Hidrológica (HRU). As HRUs são áreas agrupadas pelas combinações não-repetíveis de características semelhantes de tipo de solo, declividade e uso e ocupação do solo. O modelo simula o ciclo hidrológico e faz as previsões dos processos hidrológicos para cada HRU, utilizando

como embasamento a equação do balanço hídrico e, em seguida, para as sub-bacias correspondentes conforme a porcentagem de cada HRU nessas sub-bacias (WIBLE, 2014).

O modelo SWAT também é apto a realizar simulações de processos como erosão, crescimento de culturas agrícolas e poluição difusa, por exemplo (ABBASPOUR et al., 2015; ZHU et al., 2016; TANG et al., 2019). Além disso, o modelo encontra-se consolidado na literatura internacional como uma ferramenta eficaz, de modo a se verificar como os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica respondem às mudanças de clima e de manejo do solo (WANG et al., 2014; ZHAO et al., 2019). Para a realização da modelagem hidrológica, utilizam-se como dados meteorológicos de entrada: a precipitação, a velocidade do vento, os valores máximos e mínimos de temperatura, a radiação solar e a umidade relativa do ar; bem como as características físicas dos diferentes tipos de solos, por exemplo: percentual de minerais como areia, silte e argila, o grupo hidrológico ao qual o solo pertence e a condutividade hidráulica. Por fim, também são utilizados pelo SWAT os dados referentes ao manejo do solo, às informações topográficas, às climatológicas etc. O modelo SWAT torna possível realizar análises referentes aos impactos ocasionados, por diferentes manejos do solo a longo prazo, no aporte hídrico, bem como na sua qualidade, sendo utilizado em diversas pesquisas internacionalmente (NEITSCH et al., 2011; ZHU et al., 2016; TANG et al., 2019; ALNAHIT et al., 2020).

Zhao et al. (2019) propuseram o estudo das secas hidrológicas, em cenários futuros, utilizando as vazões simuladas pelo modelo SWAT, com base no SDI, na bacia do Rio Weihe (China), a partir de 3 modelos climáticos de circulação (seco, mediano e úmido), bem como analisaram a influência das variações de precipitação e temperatura nos eventos de seca. Os autores concluíram que, ao se utilizar o modelo seco (CSIROMk3-6-0), a frequência de secas aumenta, sendo mais crítica no fim do Século XXI, uma vez que, ao se utilizar o modelo úmido (MIROC5), existe um menor número de eventos secos quando comparado com o período de referência (1960–2004). O cenário mediano (FGOALSg2) apresentou uma redução bastante discreta na ocorrência dos eventos de seca no cenário RCP 4.5 e um incremento também discreto no cenário RCP 8.5. Verificou-se também que nos 3 modelos climáticos, as secas no futuro terão uma maior duração do que as atuais. Em relação às variáveis, concluiu-se que o fator dominante para a ocorrência nas secas hidrológicas é a alteração dos padrões de precipitação, sendo a variação de temperatura menos influente.

Djebou (2019) analisou a eficácia da reprodução dos padrões de seca hidrológica, utilizando o modelo SWAT, a partir da comparação de vazões simuladas e observadas, em

duas bacias hidrográficas norte-americanas. Os estudos concluíram que o modelo hidrológico é uma importante ferramenta para o estudo das secas hidrológicas, pois as vazões simuladas conseguiram capturar com bastante fidelidade os eventos de seca hidrológica (R^2 entre 0,52 a 0,91 em uma bacia e 0,79 a 0,89 na outra). Além disso, o autor realizou o estudo dos eventos de seca em cenários climáticos futuros e verificou que o padrão de secas futuras, a partir das vazões simuladas pelo modelo, é estatisticamente homogêneo em relação a série de SDI para o período de dados observados (1996–2015). No entanto, percebe-se que o autor utilizou na projeção um cenário climático semelhante ao atual e que as diferenças na severidade e frequência dos eventos de seca atuais e futuros são primordialmente influenciadas pelas condições climáticas projetadas. Nota-se também que o estresse hídrico provavelmente será maior no futuro em razão da maior demanda hídrica ocasionada pelo aumento nos padrões de consumo da sociedade. Por fim, concluiu-se pela eficácia do modelo utilizado em relação à fidelidade dos padrões de SDI obtidos em escala de bacia hidrográfica, sendo, portanto, uma ferramenta eficiente para o planejamento no âmbito dos recursos hídricos.

Pandhumas et al. (2020) estudaram as variações ocorridas, na severidade das secas hidrológicas, por ocasião das alterações climáticas, com base no índice de seca SDI para as escalas de 3 e 6 meses, ou seja, SDI-3 e SDI-6, utilizando as vazões simuladas oriundas das sub-bacias geradas na simulação do SWAT, com base no cenário climático futuro hipotético RCP 8.5 no período de referência 2020–2050. Os autores aplicaram essa metodologia no Baixo Curso do Rio Nam Phong, região localizada na Tailândia, cuja população frequentemente vem sofrendo com problemas de escassez hídrica causada por secas. De acordo com as análises realizadas, os autores concluíram que, com base no SDI-3, a parte leste da bacia está suscetível à ocorrência de secas extremas a severas. Já em relação ao SDI-6, a porção leste, parte do oeste e do sudeste estão vulneráveis à ocorrência também de secas extremas a severas já na próxima década (2031–2040). Com isso, os autores puderam sugerir pontos críticos na bacia em estudo que provavelmente necessitarão de maior atenção do poder público e de ações mais eficazes para mitigação da escassez hídrica.

Omer et al. (2020) analisaram a ocorrência de escassez hídrica futura na bacia do rio Yellow (China), ocasionada por influências antrópicas e mudanças climáticas (cenários RCP 4.5 e RCP 8.5), com base nas vazões simuladas pelo modelo SWAT. Os estudos indicaram, com base no índice SDI, que, em ambos os cenários estudados, as secas hidrológicas ocorrerão com maior frequência e duração do que no período atual no baixo

curso do rio, também ocorrendo secas de severidade moderada no alto curso. Porém, percebeu-se que o cenário RCP 8.5 indicou a ocorrência de secas mais frequentes e longas. O cenário RCP 4.5, por sua vez, indica a ocorrência de secas mais severas. Os autores concluíram que ambos os cenários futuros promoverão escassez hídrica, sendo de moderada a severa no cenário RCP 4.5 e moderada a extrema no RCP 8.5. No entanto, verificou-se que a escassez hídrica e as secas hidrológicas possuíam uma correlação negativa no baixo curso do rio, logo, percebe-se que a escassez causada no baixo curso é causada principalmente pela atividade antrópica, como consumo hídrico exacerbado, enquanto que no alto curso do rio é predominantemente causada por eventos de seca hidrometeorológicas, sendo a componente meteorológica da seca analisada com base no *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

A área de estudo desta pesquisa é a bacia hidrográfica do Rio Piancó (BHRP) ($38^{\circ}43'12''$ O – $37^{\circ}27'0''$ O, $6^{\circ}44'24''$ S – $7^{\circ}51'36''$ S), localizada na região semiárida do estado da Paraíba (Fig.1), sendo uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu. O Rio Piancó consiste em seu principal fluxo de água, com nascente entre os municípios de Conceição/PB e Santa Inês/PB, e foz no Rio Piranhas-Açu, na cidade de Pombal/PB. A BHRP limita-se ao norte com a bacia hidrográfica do Alto e Médio Piranhas, ao leste com a bacia do Rio Espinharas, ao sul com o estado de Pernambuco e ao oeste com o estado do Ceará, totalizando uma área de 9.205 km², que engloba de forma total ou parcial 41 municípios (e.g., Emas, Igaracy, Itaporanga) e uma população aproximada de 350.000 habitantes (IBGE, 2010). A BHRP é de grande importância para estudos em relação ao ciclo hidrológico, pois sedia o sistema hídrico Coremas – Mãe D’Água, o qual, em conjunto com os rios Piancó e Piranhas, é responsável pelo abastecimento de 30 sedes urbanas localizadas nos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte (ANA, 2023).

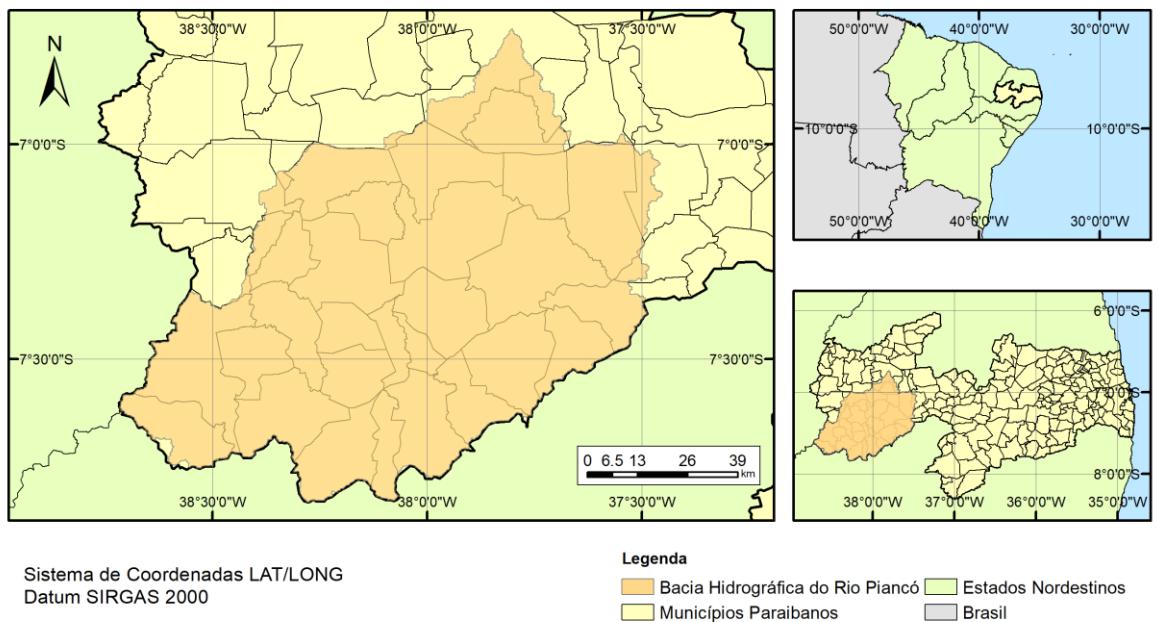


Figura 1 – Localização da BHRP no Estado da Paraíba e na região Nordeste.

A bacia (Fig. 1) está localizada em uma região quente e seca denominada “Polígono das Secas”, no semiárido nordestino, na zona climática Bsh (seco e quente), conforme classificação de Köppen. A média da temperatura anual na região possui variação de 23°C a 30°C na região, enquanto, a média anual da umidade relativa do ar varia entre 64 – 72% (INMET, 2021). A evaporação média anual da região é superior a 2000 mm, possuindo a média de 2.880 h/ano de insolação e regime pluviométrico irregular, dificultando a realização de práticas agrícolas rentáveis aos produtores, com média anual de, aproximadamente, 850 mm. Nota-se que a estação chuvosa (janeiro – maio) corresponde a mais de 70% do volume precipitado anualmente (Fig. 2). Desse modo, os meses da estação seca (junho – dezembro) possuem precipitações inferiores a 100 mm (INMET, 2021; ANA, 2021; SUDENE, 1996).

O regime fluviométrico da BHRP é intermitente, apresentando em torno de 37% de vazões nulas no período de 1970—2011, o que se agrava em anos mais secos, podendo atingir nesses anos mais de 70% de dias sem vazão, de acordo com os dados do posto fluviométrico Piancó (PAZ e FÉLIX, 2016).

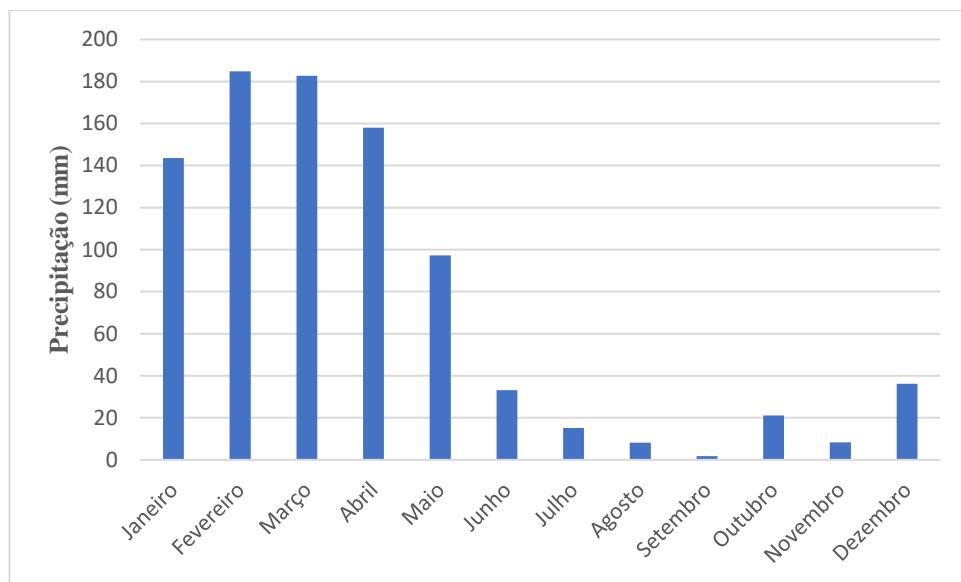


Figura 2 - Comportamento da precipitação média mensal na BHRP.

No tocante à geologia (Fig. 3), predomina, na área de estudo, o embasamento cristalino, formado em sua maioria por rochas ígneas e metamórficas, como gnaisses e migmatitos. Também estão presentes na BHRP os depósitos quaternários, a exemplo das aluviões e das coberturas dentrítico-lateríticas (ANA, 2016). Em relação aos tipos de solos, predominam solos desfavoráveis à exploração da agricultura: Luvissolo Crômico (24,3%), o Neossolo Litólico (58,8%) e o Argissolo Vermelho-amarelo (12,7%) (ANA, 2016; SILVA et al., 2021).

Na BHRP, predomina a vegetação formada basicamente por plantas xerófilas, do bioma caatinga, com destaque para espécies herbáceas e arbustivas, a exemplo das cactáceas e das árvores de pequeno e médio porte (BRANCO, 2017). Destaca-se que a agricultura é a atividade econômica de maior importância na BHRP. Em relação à topografia, com base no Modelo Digital de Elevação (MDE), obtido a partir do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (resolução de 30 m), a altitude média da bacia foi estimada em 432 metros, apresentando uma faixa de variação de 214 – 725 metros, com declividade variando entre 0 – 8%.

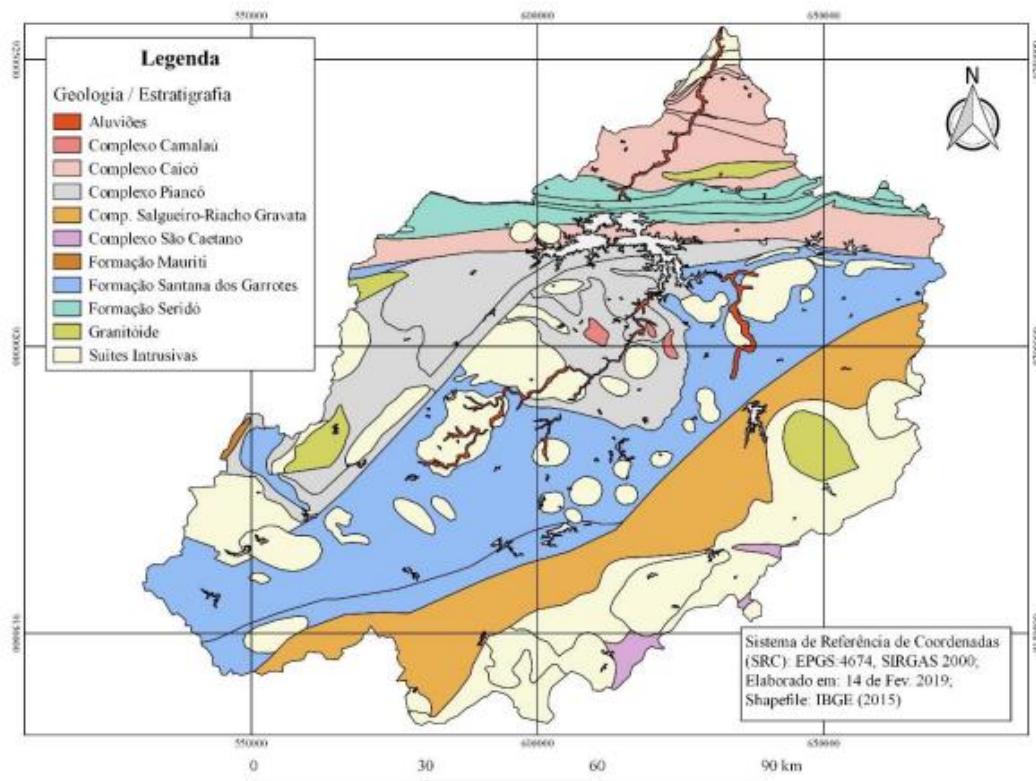


Figura 3 – Mapa geológico da BHRP (Fonte: Adaptado de Silva et al., 2021).

4.2. Modelagem hidrológica

Para que os objetivos propostos nesse estudo fossem atingidos, foi necessário utilizar um modelo hidrológico, de modo que as vazões em cenários futuros possam ser simuladas. Conforme mencionado, o modelo SWAT (ARNOLD et al., 1998) se caracteriza por ser uma ferramenta valiosa na reprodução dos fenômenos relacionados à hidrologia das bacias hidrográficas, bem como por ser comprovadamente eficaz na captura de eventos de secas hidrológicas com base no SDI (PANDHUMAS et al., 2020; ZHAO et al., 2019; DJEBOU, 2019). Desse modo, esse modelo foi selecionado para simular a hidrologia da bacia em estudo.

O modelo SWAT utiliza a equação do balanço hídrico (Eq. 1) para a simulação do ciclo hidrológico, incorporando oito elementos principais: hidrologia, clima, temperatura do solo, aporte de sedimentos, crescimento da vegetação, nutrientes, pesticidas e práticas agrícolas (DHAR e MAZUMDAR, 2009):

$$SW_t = SW_0 + \sum(R - Q_{surf} - ET - P - Q_{lat} - Q_{gw}) \quad (\text{Eq. 1})$$

em que:

SW_t = Aporte hídrico final do solo (mm);

SW_0 = Aporte hídrico inicial do solo (mm);

R = Precipitação (mm);

Q_{surf} = Escoamento superficial (mm);

ET = Evapotranspiração (mm);

P = Percolação de água da camada em simulação para a inferior (mm);

Q_{lat} = Escoamento lateral (mm);

Q_{gw} = Escoamento de retorno ao curso d'água devido ao escoamento subsuperficial (mm).

Para a simulação do escoamento superficial na bacia, o modelo SWAT possui como referência o Método da Curva Número (Eqs. 2 e 3), estabelecido pelo *Soil Conservation Service* (SCS), atualmente denominado *Natural Resources Conservation Service* (NRCS). Essa metodologia se caracteriza por sua simplicidade, previsibilidade e estabilidade (PONCE e HAWKINS, 1996).

$$Q_{surf} = \frac{(R-0,2S)^2}{(R+0,8S)} \quad (\text{Eq. 2})$$

em que:

Q_{surf} = Vazão acumulada ou excesso precipitado (mm);

R = Volume de chuva diário (mm);

S = índice de retenção (mm).

Para calcular o índice de retenção, tem-se:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{Eq. 3})$$

em que:

CN = valor da Curva-Número referente a um dia.

A determinação do valor da Curva-Número depende de fatores como as características do solo, por exemplo: tipo, uso e ocupação do solo e aporte hídrico pré-existente no solo. O valor do CN varia de 1 a 100, sendo o CN igual a 1 em um solo ideal perfeitamente impermeável, ou seja, um solo que retém todo o volume precipitado. Por fim, o CN igual a 100 corresponde a um solo totalmente impermeável, ou seja, não ocorre retenção de água de chuva no solo, sendo a totalidade da precipitação convertida em escoamento superficial.

Em relação à determinação quantitativa da produção de sedimentos, os fatores influenciadores são características como: topografia, características do solo e de seu manejo, bem como atividades antrópicas. O modelo SWAT se utiliza da equação *Modified Universal Soil Loss Equation* (MUSLE) (WILLIAMS, 1995a) (Eq. 4), para calcular a degradação do solo ocasionada pelo impacto gerado pelas chuvas e pelas vazões.

$$Sed = 11,8 \times (Q_{surf} \times q_{peak})^{0,56} \times K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE} \quad (\text{Eq. 4})$$

em que:

Sed = produção de sedimentos (ton);

Q_{surf} = volume de vazão (m^3);

q_{peak} = taxa de escoamento de pico (m^3/s);

K_{USLE} = parâmetro de erodibilidade do solo;

C_{USLE} = parâmetro relacionado à cobertura e ao manejo do solo;

P_{USLE} = parâmetro relacionado às práticas conservacionistas aplicadas no local;

LS_{USLE} = parâmetro relacionado à topografia;

As demais metodologias para cálculo e as informações sobre as variáveis encontradas na MUSLE podem ser observadas em Zhang et al. (2009).

4.2.1. Delimitação da bacia hidrográfica

Para a criação do projeto no modelo SWAT, seguem-se os seguintes procedimentos (Fig. 4):

- i) Realização do particionamento da bacia hidrográfica em unidades menores (sub-bacias), tendo por base o Modelo Digital de Elevação (MDE);
- ii) Concepção da rede de drenagem da bacia hidrográfica, com base na topografia;
- iii) Inserção de arquivos referentes às características da área de estudo, como: tipo de solos e uso e cobertura do solo para geração das Unidades de Resposta Hidrológica (HRU);
- iv) Inserção de informações meteorológicas, como precipitação e radiação solar, por exemplo, com o objetivo de simular as vazões.

O MDE utilizado nesta pesquisa foi o proveniente do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), disponibilizado pelo *United States Geological Survey* (USGS), o qual possui 30 metros de resolução. O MDE torna possível calcular, com base na topografia do local, as direções de fluxo do escoamento superficial e os pontos de acumulação. Assim, é gerada a rede de drenagem para a região em estudo, sendo a bacia hidrográfica discretizada em menores unidades (sub-bacias), cada uma com seu respectivo exutório. De acordo com o exutório selecionado como o principal, é realizada a delimitação da bacia hidrográfica. Por fim, são calculados os índices topográficos, como declividade média e área de extensão da bacia, para cada uma das sub-bacias. Além disso, nessa etapa, é praticável a alocação de reservatórios de acumulação (açudes) na simulação do modelo, nos casos em que seja verificada a influência desses corpos hídricos na dinâmica da bacia. No entanto, os reservatórios existentes na área em estudo não foram considerados na simulação, tendo em

vista que o posto fluviométrico utilizado para a modelagem encontra-se à montante dos reservatórios. Logo, considera-se o fluxo natural da rede de drenagem, sem regularização de vazões.

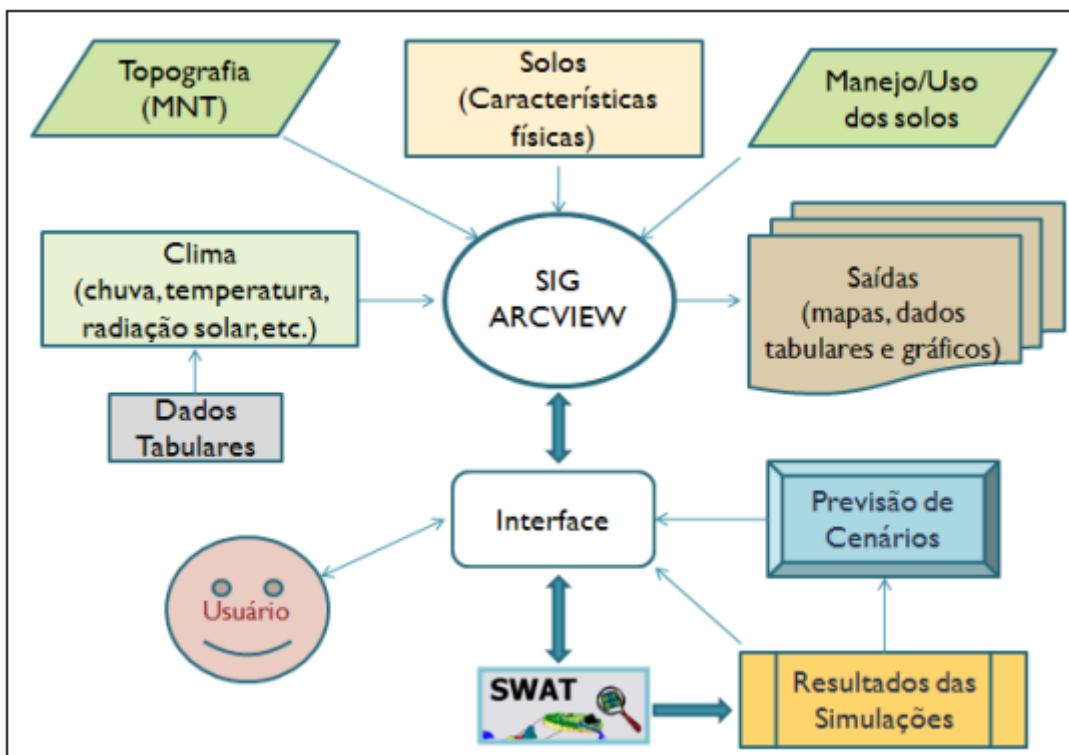


Figura 4 – Fluxograma do processo de modelagem hidrológica a partir do modelo SWAT

Fonte: Adaptado de Uzeika (2009).

No modelo SWAT, a divisão automática das sub-bacias é realizada ao se especificar a área de drenagem limite, a qual corresponde a dimensão mínima de área capaz de estabelecer um canal de drenagem. Logo, cada sub-bacia se relaciona a um canal de fluxo ou a um exutório, o qual direciona o escoamento hídrico da sub-bacia. Realizar a definição da área mínima influencia no traçado da rede de drenagem e também no número e tamanho das subunidades. A depender da dimensão da bacia em análise, do aporte de dados de entrada disponíveis, do detalhamento requerido e dos objetivos do estudo, determina-se a quantidade de sub-bacias na simulação hidrológica (MACHADO, 2002). Para a definição da área mínima e, consequentemente, para a formação das sub-bacias, observa-se que, de acordo com Jha (2004), deve-se utilizar valores entre 2 e 6% da área da

bacia delimitada pelo modelo. O limiar de área mínima utilizado correspondeu a 5000 hectares, resultando em 106 sub-bacias.

Após discretizar a rede de fluxo hídrico e realizar a geração das sub-bacias, inserem-se dados quanto ao tipo de solo e de uso e ocupação do solo, de modo que são geradas as HRUs, sendo estas importantes para avaliar a heterogeneidade de condições físicas na bacia. O modelo dispõe de duas opções para a determinação das HRUs: uma única HRU por sub-bacia, determinada pelas características preponderantes em relação à declividade, cobertura do solo etc., ou múltiplas HRUs em cada sub-bacia, sendo cada HRU uma composição dos parâmetros caracterizadores (topografia, tipo do solo etc.). A distribuição de múltiplas HRUs é realizada estabelecendo-se um limiar de sensibilidade, o qual desconsidera classes de uso, tipo do solo e topografia com áreas inferiores ao valor mínimo arbitrado (LELIS, 2011). A subdivisão das sub-bacias possibilita que o modelo represente melhor as diferenças das condições hidrológicas para diferentes usos e solos em uma mesma sub-bacia, o que proporciona aumento na precisão das previsões e fornece uma melhor descrição do balanço hídrico da bacia hidrográfica (MACHADO, 2002; ARNOLD et al., 1998). Para fins de modelagem hidrológica da BHRP, foi utilizado o limiar inferior de 15%, logo cada Unidade de Resposta Hidrológica possui área correspondente a, no mínimo, 15% do total. Este limiar foi determinado em virtude das dimensões da BHRP, pois quanto menor o limiar, maior é a capacidade do modelo hidrológico em distinguir áreas com diferentes classes de solo e práticas de manejo do solo, por exemplo. Além disso, a área mínima de 15% é frequentemente recomendada para o modelo SWAT, porque ela foi considerada adequada para minimizar os efeitos das bordas da bacia hidrográfica, bem como das variações no clima e na topografia dentro da área de estudo. Além disso, áreas mínimas maiores que 15% podem levar a problemas de precisão e desempenho do modelo, já que a complexidade e a necessidade de entrada de dados aumentam significativamente.

4.2.2. Uso e cobertura do solo

A coleção 5 do Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MapBiomass), a qual foi publicada em agosto de 2020, com 21 classes de legenda cobrindo o período de 1985 – 2019, foi utilizada como referência para realizar a discretização das diversas classes de uso e cobertura do solo na BHRP (MapBiomass,

2021). O MapBiomas foi desenvolvido com o propósito de produzir mapas anuais e de recuperar dados históricos de uso e ocupação do solo no Brasil, de maneira atualizada, célere e não-onerosa, utilizando plataforma de análise geoespacial baseada em nuvem no GEE, a partir de métodos que dispõem de classificadores organizados de modo automatizado. A BHRP, de acordo com a coleção 5 do MapBiomas, apresenta vegetação arbórea/arbustiva, vegetação arbustiva, pastagem, solos descobertos, áreas urbanizadas, corpos hídricos e áreas agrícolas.

4.2.3. Tipos de Solos

A identificação dos solos da BHRP foi realizada com base no Mapa de Solos do Brasil disponibilizado pela EMBRAPA e publicado pelo IBGE (2021), sendo identificadas 4 classes: Neossolo Litólico (59,54%), Luvissolo Crômico (27,36%), Argissolo Vermelho-Amarelo (11,67%) e Cambissolo Háplico (1,43%).

Os Neossolos Litólicos compreendem solos rasos com topografia característica de declives acentuados. Esses declives acentuados, a profundidade insuficiente, bem como a predominância de superfícies rochosas são fatores limitantes para a exploração econômica. Além disso, esse tipo de solo apresenta forte tendência à erosão.

De acordo com Embrapa (2021), os Luvissolos Crônicos são solos tipicamente encontrados na região Nordeste brasileira, sobretudo em áreas de semiárido, onde ocorre escassez hídrica. A topografia característica desse tipo de solo é de relevos com ondulações discretas e de pouca profundidade, comumente de até 1 metro de extensão vertical e mudanças abruptas em sua textura. Por sim, destaca-se que esse tipo de solo é passível de sofrer erosão.

Os Cambissolos Háplicos são solos considerados rasos e com relevo declivoso, sendo esses fatores limitantes para sua exploração econômica, de maneira análoga aos Neossolos Litólicos. Além disso, é comum a existência de corpos rochosos na composição desse solo. De acordo com Embrapa (2021), os Argissolos Vermelho-Amarelos possuem, diferentemente dos demais da BHRP, grande profundidade, no entanto, são solos pouco férteis, ocasionados por alta acidez e argilas de baixa atividade. Em geral, esses solos possuem bom sistema de drenagem e boa estrutura, sendo provenientes principalmente de rochas cristalinas.

Para que o balanço hídrico seja simulado no modelo SWAT, torna-se necessário incluir, na modelagem hidrológica, os dados referentes aos solos existentes na bacia em estudo. Esses dados referem-se às características hidrofísicas de cada tipo de solo: percentuais de areia, silte e argila, porosidade, albedo etc.

Os dados de número de horizontes do solo (NLAYERS), profundidade dos horizontes (SOL_Z), profundidade máxima da raiz (SOL_ZMX), textura (TEXTURE), percentagens de areia (SAND), silte (SILT), argila (CLAY), cascalho (ROCK) e carbono orgânico (CBN) para a BHRP foram obtidos com base no Banco de Dados de Solos (BD Solos) da EMBRAPA, disponível em: https://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/consulta_publica.html.

Para a determinação do grupo hidrológico (HYDGRP) de cada solo, utilizou-se a classificação de NRCS (2009), a qual diferencia os solos em 4 classes (A, B, C e D), com base no potencial de escoamento do solo. Essas classes variam gradativamente, sendo os solos mais permeáveis classificados na categoria A, enquanto que solos impermeáveis são os de categoria D.

A porosidade do solo (ANION_EXCL) e a condutividade hidráulica (SOL_K) foram definidas utilizando como referência o trabalho de Rawls et al. (1982). Esse autor estabeleceu os valores de porosidade e condutividade hidráulica para 11 diferentes classes texturais de solo, como exemplo: arenoso, argilo-siltoso, argilo-arenoso etc.

Os valores referentes ao albedo do solo (SOL_ALB) foram determinados com base no sensor *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), conforme proposto por Tsvetsinskaya et al. (2002), o qual definiu os valores de albedo referentes a diversos tipos de solo. O albedo foi classificado em quatro categorias: baixo, moderado, alto e muito alto.

A capacidade hídrica disponível no solo (SOL_AWC) foi determinada de acordo com Salter e Williams (1967; 1969), a partir da classe textural do solo. Em relação ao parâmetro de densidade aparente do solo (SOL_BD), utilizou-se o software *Soil Water Characteristics Hydraulic Properties Calculator*, criado por Saxton e Rawls (2006), disponível em: <https://hrsl.ba.ars.usda.gov/soilwater/Index.htm>, para se determinar o valor referente à BHRP. Esse software necessita dos seguintes dados de entrada: textura do solo, salinidade, grau de compactação, presença de matéria orgânica e cascalho no solo.

Para determinação do fator de erodibilidade do solo (USLE_K), esta pesquisa baseou-se na equação proposta por Williams (1975b), na qual o fator de erodibilidade é

calculado em relação aos percentuais de areia, silte, argila e carbono orgânico existentes no solo.

A condutividade elétrica do solo (SOL_EC) utilizada foi a recomendada por Paes et al. (2013) e Nazário et al. (2007). E, por fim, no tocante ao parâmetro de fração de fissuras no solo (SOL_CRK), optou-se por utilizar o valor *default* do ArcSWAT, tendo em vista que não foram encontrados, na literatura pertinente, métodos de determinação desse índice.

4.2.4. Declividade

As diferentes faixas de declividade da BHRP foram definidas, a partir do Modelo Digital de Elevação *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com base nas classes estabelecidas pela Embrapa (1979), sendo o relevo discretizado em 6 categorias:

- a) Plano (declividade entre 0 a 3%): superfícies de topografia horizontal, com desníveis muito pequenos;
- b) Suave ondulado (entre 3 e 8%): superfície pouco movimentada, apresentando altitudes relativas variando entre 50 a 100 m, com relevos pouco declivosos;
- c) Ondulado (entre 8 e 20%): de modo análogo à classe suave ondulada, esta classe também apresenta superfície pouco movimentada, com colinas e/ou outeiros;
- d) Forte ondulado (entre 20 e 45%): superfície movimentada, constituída de outeiros e/ou morros (altitude relativa 100 – 200m);
- e) Montanhoso (entre 45 e 75%): superfície com predominância de relevo declivoso, apresentando morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos;
- f) Escarpado (maiores que 75%): formado principalmente por desníveis abruptos, apresentando, por exemplo, falésias com declives muito fortes.

As disposições das classificações de uso e cobertura do solo, dos tipos de solo e da topografia na bacia do Rio Piancó estão contidas na figura abaixo (Fig. 5):

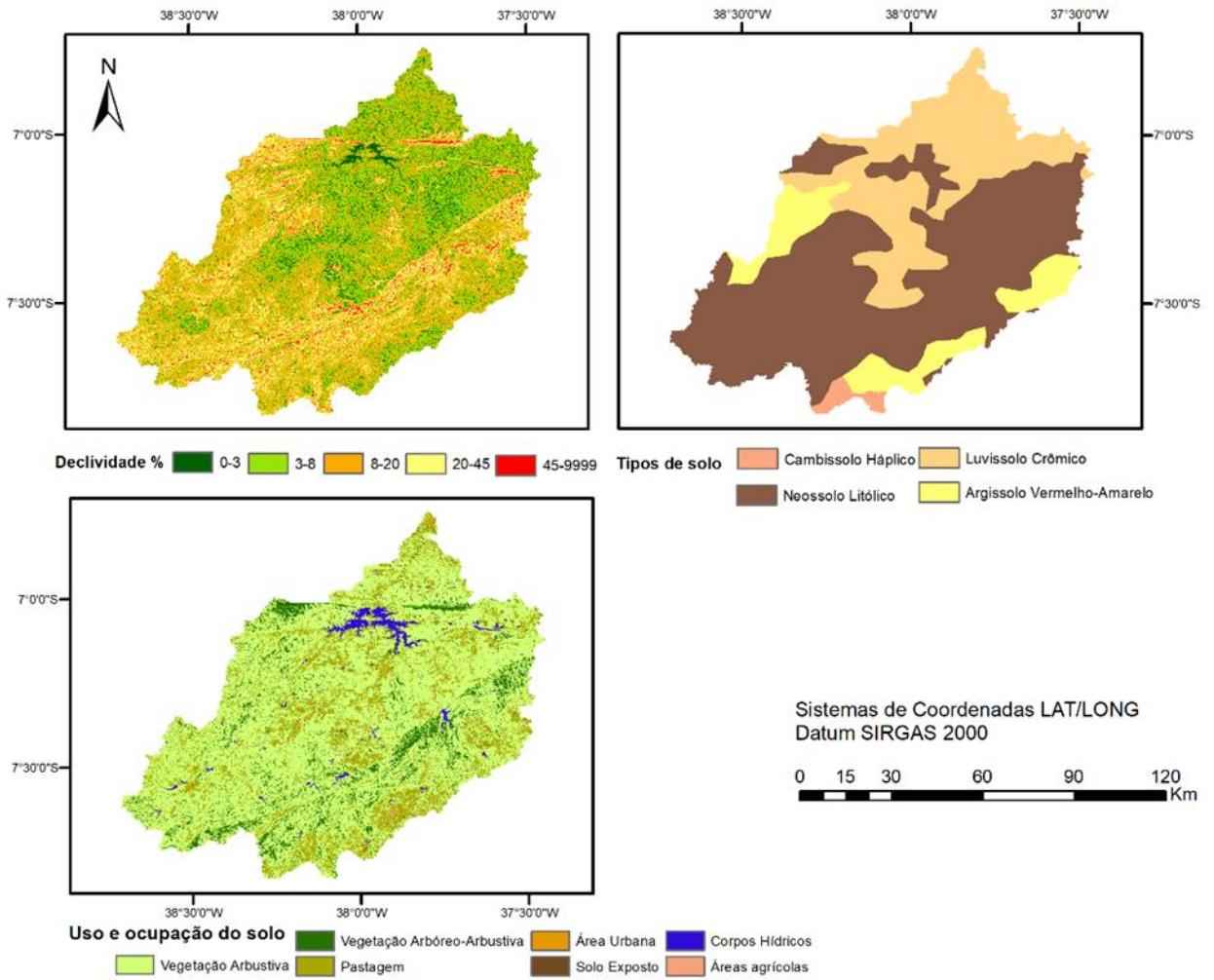


Figura 5 – Topografia, Tipos de solo e Uso do solo da bacia hidrográfica do Rio Piancó.

4.2.5. Gerador climático

Na sequência dos procedimentos necessários para a realização da modelagem hidrológica, está a etapa de incluir no modelo os dados climáticos. Para a criação do gerador climático, são necessários dados de temperatura, precipitação, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar global.

Os dados pluviométricos diários da BHRP foram obtidos a partir de 16 postos pluviométricos das bases de dados da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA, compreendendo o período de 1990 a 2010. Como pode ser observado na figura abaixo (Fig. 6), os postos pluviométricos encontram-se bem espacializados:



Figura 6 – Postos pluviométricos da BHRP utilizados no estudo.

Como havia falhas no registro da precipitação nas estações pluviométricas utilizadas nesse estudo, foi realizado o preenchimento das falhas pelo método da ponderação regional, o qual se utiliza das medições de, no mínimo, 3 postos pluviométricos localizados em região climatológica semelhante, de acordo com a equação abaixo (Eq. 5):

$$Px = \frac{1}{3} \left(\frac{P1}{Pm1} + \frac{P2}{Pm2} + \frac{P3}{Pm3} \right) \cdot Pmx \quad (\text{Eq. 5})$$

em que:

Px = Precipitação do posto X a ser determinada;

P1, P2 e P3 = Precipitações dos postos vizinhos;

Pm1, Pm2 e Pm3 = Precipitações médias das estações vizinhas;

Pmx = Precipitação média do posto a ser corrigido.

Em relação aos dados fluviométricos, foram utilizadas as vazões mensais do posto fluviométrico Piancó, referente aos anos de 1990 a 2010, provenientes da Agência Nacional de Águas – ANA, disponíveis no portal HIDROWEB, sob o domínio da ANA. Esses dados de vazão foram utilizados para realizar a calibração do modelo hidrológico. O

posto Piancó (código 37340000) localiza-se entre a latitude $-7,20^{\circ}$ e longitude $-37,93^{\circ}$, com altitude de 249 m.

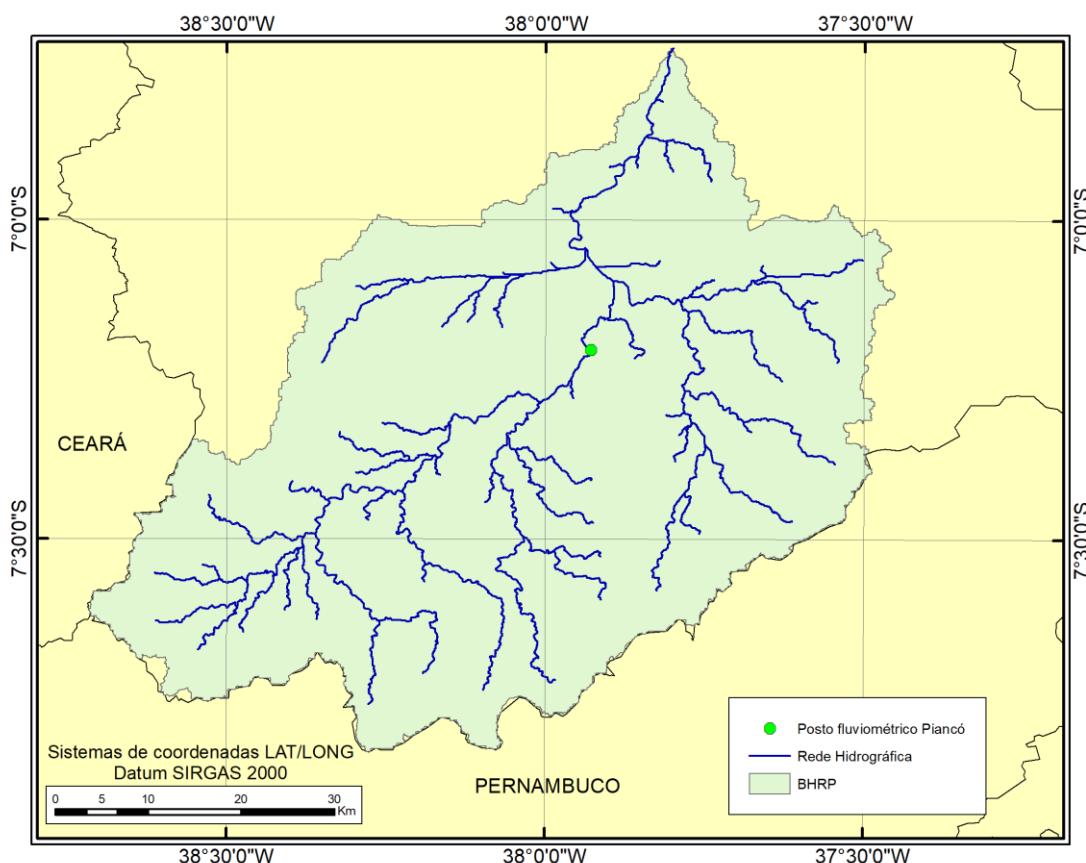


Figura 7 – Rede de Drenagem da BHRP e localização do posto fluviométrico.

O posto Piancó representa uma área de drenagem de 4170 km² e não sofre influência de reservatórios de acumulação a montante, é possível observar a localização espacial do posto Piancó na Figura 7. A partir da Figura 5, no mapa Uso e Ocupação do solo, é possível perceber que os reservatórios de acumulação estão a jusante do posto fluviométrico Piancó, o que corrobora o entendimento de que o posto Piancó não sofre influência de reservatórios. Portanto, não houve análise da influência de açudes na dinâmica hídrica da bacia em estudo.

Os dados meteorológicos, referentes ao período de 1983 a 2011, foram obtidos de acordo com a estação meteorológica São Gonçalo ($38^{\circ}13'12''$ O, $6^{\circ}45'00''$ S), sob responsabilidade do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponíveis no portal Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Os dados obtidos foram temperaturas máximas e mínimas, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Pode-se

observar, na tabela abaixo (Tab. 1), os parâmetros do gerador climático (WGEN) necessários para a simulação do modelo SWAT.

O cálculo do parâmetro DEWPT (Média das temperaturas diárias de ponto de orvalho a cada mês) foi realizado a partir do software “dew02” criado por Liersch (2003a), o qual se utiliza dos dados de médias mensais de precipitação e umidade relativa do ar. Os parâmetros PCPSKW (Coeficiente de assimetria para a precipitação diária de cada mês), PR_W1 (Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos no mês), PR_W2 (Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos no mês) e PCPD (Número de dias com precipitação no mês), por sua vez, foram determinados utilizando o software “pcpSTAT” (LIERSCH, 2003b). Para definição do parâmetro RAINHHMX (Precipitação máxima para 30 min de chuva em todo o período de registro no mês), utilizou-se o método proposto por Oliveira et al. (2000), no qual a precipitação máxima é multiplicada por um fator de desagregação, sendo, neste trabalho, utilizado o fator de 1/3.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados no gerador climático da modelagem hidrológica.

Parâmetro	Definição
TMPMX	Médias das temperaturas máximas diárias de cada mês
TMPMN	Média das temperaturas mínimas diárias de cada mês
TMPSTDMX	Desvio padrão para temperaturas máximas diárias de cada mês
TMPSTDMN	Desvio padrão para temperaturas mínimas diárias de cada mês
PCPMM	Média mensal da precipitação total
PCPSTD	Desvio padrão para a precipitação diária do mês
PCPSKW	Coeficiente de assimetria para a precipitação diária de cada mês
PR_W1	Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos no mês
PR_W2	Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos no mês
PCPD	Número de dias com precipitação no mês
RAINHHMX	Precipitação máxima para 30 min de chuva em todo o período de registro no mês
SOLARAV	Média da radiação solar diária para cada mês
DEWPT	Média das temperaturas diárias de ponto de orvalho a cada mês
WNDAV	Média da velocidade diária do vento para cada mês

Ao fim da inclusão do gerador climático no SWAT, procedeu-se com a modelagem, simulando os processos hidrológicos da bacia em estudo. Porém, usualmente, os dados

simulados primários não possuem um ajuste satisfatório em relação aos dados observados, sendo, portanto, necessário realizar a etapa de calibração, com o objetivo de otimizar os parâmetros utilizados, de modo que o modelo represente de forma fidedigna a realidade da bacia. Além disso, torna-se também necessária a etapa de validação do modelo, para que se verifique que as simulações podem ser utilizadas com boa confiabilidade em períodos diferentes do calibrado, de modo a ser possível projetar vazões futuras com satisfatória eficiência, por exemplo.

4.2.6. Análise estatística do desempenho da modelagem hidrológica

Para avaliar a eficiência das simulações realizadas referentes ao período de 1993–2010, esta pesquisa utilizou como base dois índices estatísticos: o coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de eficiência (NSE) (NASH e SUTCLIFFE, 1970).

O coeficiente de determinação (Eq. 6) estabelece a relação linear entre duas séries de dados, sendo, no presente estudo, as vazões observadas de acordo com o posto fluviométrico e as vazões simuladas pelo modelo hidrológico. Portanto, esse coeficiente é capaz de determinar o quanto os valores simulados são ajustados em relação à realidade, analisando a capacidade de predição do modelo, no tocante à dinâmica do escoamento superficial da bacia. Esse coeficiente pode assumir valores com variação de 0–1, no qual o limite máximo corresponde ao ajuste perfeito.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m) - (x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m) (x_i - x_m)^2}} \right)^2 \quad (\text{Eq. 6})$$

O NSE (Eq. 7), por sua vez, corresponde a um dos índices mais indicados para o estudo do desempenho de modelos hidrológicos. O NSE pode assumir valores entre $-\infty$ a 1, sendo o limite máximo correspondente a situações nas quais ocorre o perfeito ajuste e valores negativos correspondendo a situações em que as estimativas do modelo apresentam predições menos adequadas do que a média da série observada.

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \right) \quad (\text{Eq. 7})$$

A partir dos valores do R^2 e do NSE, torna-se possível obter uma classificação em relação à eficiência das simulações hidrológicas realizadas, sendo essa classificação ordenada de modo decrescente entre muito boa a insatisfatória, de acordo com a tabela abaixo (Tab. 2) (MORIASI et al., 2007):

Tabela 2 – Desempenho de modelos hidrológicos com base no R^2 e no NSE.

Classificação	R^2	NSE
Muito boa	$0,80 < R^2 \leq 1$	$0,75 < NSE \leq 1$
Boa	$0,70 < R^2 \leq 0,80$	$0,65 < NSE \leq 0,75$
Satisfatória	$0,60 < R^2 \leq 0,70$	$0,50 < NSE \leq 0,65$
Insatisfatória	$R^2 \leq 0,60$	$NSE \leq 0,50$

4.2.7. Calibração e validação do modelo SWAT

Devido ao fato de as simulações iniciais usualmente não serem satisfatórias, deve-se realizar a calibração do modelo, de modo a se obter valores mais apropriados à realidade da bacia hidrográfica em estudo, referentes aos parâmetros utilizados no modelo SWAT. O período selecionado com o objetivo de realizar a calibração foi de 1993–2005, visto que três anos de dados de precipitação (1990–1992) foram utilizados como aquecimento da modelagem.

Utilizou-se o software *SWAT Calibration and Uncertainty Programs* (SWAT-CUP) para a realização da calibração do modelo hidrológico, com base no algoritmo de autocalibração *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI-2), criado por Abbaspour et al. (2007). Esse algoritmo estabelece, em relação aos parâmetros utilizados na modelagem, valores otimizados, ou seja, condizentes com a realidade da dinâmica hídrica da bacia hidrográfica. O SUFI-2 também realiza a análise de incertezas, calibrações multi-paramétricas e análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados, tornando possível identificar quais parâmetros influenciam mais nas previsões das vazões simuladas. Por fim, esse algoritmo analisa uma gama de arranjos entre os parâmetros utilizados, combinando-os, de acordo com os intervalos previamente definidos na calibração do modelo, com o objetivo de obter o melhor ajuste final em relação aos índices estatísticos utilizados (ROCHA, 2013).

Neste trabalho, para fins de calibração do modelo hidrológico, utilizou-se apenas as vazões mensais como dados de entrada, tendo em vista que não existem dados observados referentes à produção de sedimentos na BHRP.

Para a calibração da BHRP, 15 parâmetros foram selecionados (Tab. 3), de modo que, a cada execução do algoritmo, fossem realizadas 500 iterações, sendo que, a cada iteração, o algoritmo ajusta os valores dos parâmetros, com o objetivo de conferir semelhança entre a predição realizada e os dados observados. Ao fim do processo de calibração, são obtidos os valores ajustados dos parâmetros para a área em estudo, os valores resultantes dos índices estatísticos utilizados como base na calibração e o ordinal da iteração que melhor se adequou aos dados observados.

Então, inserem-se os valores ajustados dos parâmetros no software ArcSwat, de acordo com a operação definida pelo SWAT-CUP (adição, multiplicação ou substituição), e então simula-se um novo período para que as vazões simuladas sejam comparadas estatisticamente com as observadas, sendo essa etapa denominada validação. O período de validação desse estudo corresponde aos anos de 2008 a 2012.

Tabela 3 – Parâmetros referentes ao processo de calibração do modelo hidrológico.

Parâmetros	Descrição	Intervalo	Método de alteração
Alpha_Bf	Fator de recessão de escoamento de base (dias)	0–1	r
Biomix	Eficiência da mistura biológica do solo (adimensional)	0–1	r
Canmx	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação (mm)	0–100	r
Cn2	Valor da curva número para a condição de solo úmido (adimensional)	–1–1	v
Ch_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/h)	–0,01–500	r
Ch_N2	Coeficiente de Manning do canal (adimensional)	–0,01–0,3	r
Epc0	Coeficiente de compensação da absorção de água pelas plantas (adimensional)	0–1	r
Esco	Coeficiente de compensação da evaporação de água no solo (adimensional)	0–1	r
Revapmn	Limite de água no solo para que ocorra ascensão capilar na zona saturada (mm)	0–500	r
S1subbsn	Comprimento da declividade média (m)	–1–1	v
Sol_AlB	Albedo do solo (adimensional)	–1–1	v

Parâmetros	Descrição	Intervalo	Método de alteração
Sol_Awc	Capacidade de armazenamento de água no solo (mm/mm)	–1–1	v
Sol_K	Condutividade hidráulica saturada do solo (mm/h)	–1–1	v
Sol_Z	Profundidade da camada de solo (mm)	–1–1	v
Surlag	Tempo de retardo do escoamento superficial (dias)	0,05–24	r

Substituição (v): o valor default do modelo é substituído pelo valor otimizado obtido na calibração; Adição (a): o valor obtido no processo de calibração é adicionado ao valor default do SWAT; Multiplicação (r): o valor default do modelo é multiplicado pelo resultado da soma (1 + valor obtido no processo de calibração).

4.3. Cenários climáticos futuros

Após a inserção dos parâmetros otimizados, foram elaborados os geradores climáticos dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 com o objetivo de simular, a partir do modelo hidrológico, os dados fluviométricos futuros. Os modelos de projeções climáticas são estabelecidos a partir de um conjunto de condições de contorno e por cenários de emissões de Gases do Efeito Estufa, *Representative Concentration Pathways* (RCP).

Nessa pesquisa, foram utilizados dois cenários, conforme mencionado anteriormente, RCP 4.5 e RCP 8.5. Os dados climáticos referentes ao período de 2030–2099 para a BHRP foram obtidos com base nos dados gerados pelo CPTEC/INPE e disponibilizados na Plataforma PROJETA – Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul Regionalizadas pelo Modelo ETA (ProjETA), disponível em <<https://projeta.cptec.inpe.br/#/dashboard>>, de acordo com as informações do modelo HadGEM2-ES (20 km de resolução espacial).

O cenário RCP 4.5 corresponde a um cenário de estabilização intermediário, portanto, mais otimista, no qual o Dióxido de Carbono (CO₂) atinge cerca de 650 ppm, até o final do século XXI. Nesse cenário, considera-se que os métodos utilizados para inibir as emissões de gases do efeito estufa (estabilização do consumo energético mundial, planejamentos intensos de reflorestamento e políticas climáticas rígidas) promovem a estabilização em 4,5 W/m² antes do ano 2100.

O cenário RCP 8.5 corresponde a altas emissões de gases do efeito estufa, no qual o Dióxido de Carbono excede o patamar de 1000 ppm e as forças radioativas atingem 8,5 W/m² até 2100. Esse cenário caracteriza um aumento contínuo da população, forte

dependência dos combustíveis fósseis e a realização de nenhuma mudança política para redução dos gases do efeito estufa, sendo o cenário mais pessimista, em relação às emissões, e o mais próximo das tendências de emissões atuais.

Projeções climáticas representam o resultado obtido ao se simular, a partir de modelos climáticos, a influência das emissões e das variações nas concentrações de gases de efeito estufa e aerossóis, em dado sistema climático, referentes a cenários futuros. Utilizam-se como dados para a realização das projeções do clima outros modelos globais, a exemplo das informações de concentração de gelo marinho, temperatura do ar, vento, umidade relativa do ar, entre outras.

As projeções são de suma importância para a realização de análises referentes ao estudo da dinâmica climática. Para a realização de projeções climáticas, são levantadas hipóteses sobre a evolução de uma sociedade, em termos econômicos e tecnológicos, bem como a mudanças nos padrões de consumo de uma comunidade, crescimento populacional, globalização (INPE, 2021; IPCC, 2018).

4.4. Análise dos eventos de seca hidrológica

A partir das vazões simuladas, foram calculados os valores de SDI para cada uma das escalas temporais em estudo (3, 6, 9 e 12 meses). Inicialmente, obtém-se o valor dos volumes acumulados de vazão (Eq. 8):

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j} \quad (\text{Eq. 8})$$

em que:

$V_{i,k}$ = Volume de vazão acumulado para o ano hidrológico i e para o período de referência k ;

$Q_{i,j}$ = Vazões mensais para o ano hidrológico i e para o mês j ;

$k = 1$ (outubro a dezembro), $k = 2$ (outubro a março), $k = 3$ (outubro a junho) e $k = 4$ (outubro a setembro).

Então, o SDI é calculado a partir da Eq. 9:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{s_k} \quad (\text{Eq. 9})$$

em que:

$SDI_{i,k}$ = Valor do índice SDI para o ano hidrológico i e para o período de referência k;

$V_{i,k}$ = Volume de vazão acumulado;

\bar{V}_k = Média do volume acumulado para o período k de referência;

s_k = Desvio-padrão do volume acumulado para o período k de referência.

De acordo com o valor do SDI, os eventos de secas hidrológicas são classificados em cinco níveis de severidade (Tab. 4):

Tabela 4 – Classificação da seca hidrológica quanto à severidade.

Estado	Descrição	Critério
0	Úmido	$SDI > 0,0$
1	Seca leve	$-1,0 \leq SDI < 0,0$
2	Seca moderada	$-1,5 \leq SDI < -1,00$
3	Seca severa	$-2,00 \leq SDI < -1,5$
4	Seca extrema	$SDI < -2,00$

Em pequenas bacias hidrográficas, o fluxo de vazão pode possuir geralmente distribuições enviesadas de probabilidade (NALBANTIS e TSAKIRIS, 2009). Logo, realiza-se a normalização da série, com o objetivo de calcular o SDI, utilizando uma distribuição log-normal de dois parâmetros, a partir dos logaritmos naturais dos volumes de vazão (Eqs. 10 e 11):

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,k} - \bar{y}_k}{s_{y,k}} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$y_{i,k} = \ln(V_{i,k}) \quad (\text{Eq. 11})$$

em que:

$y_{i,k}$ = logaritmos naturais dos volumes de vazão acumulada;

\bar{y}_k e $s_{y,k}$ = média e desvio-padrão dos logaritmos naturais dos volumes de vazão acumulada, respectivamente.

5. RESULTADOS

5.1. Calibração e validação do modelo

A calibração das vazões mensais da bacia do Rio Piancó, realizada pelo SWAT-CUP, apresentou um ótimo desempenho ($R^2 = 0,83$ e $NSE = 0,82$), sendo esse resultado semelhante aos encontrados por Karakoyun et al. (2022) e Nagireddy et al. (2022) em modelagens hidrológicas realizadas em bacias localizadas na Turquia e na Índia, respectivamente. A Figura 8 representa o hidrograma da BHRP, no período de 1993 a 2005. Pode-se perceber que ocorre analogia das curvas de vazões observadas e simuladas, inclusive quanto aos picos de vazão e aos períodos de seca. Quanto aos valores médios de vazão, tem-se média de $10,12 \text{ m}^3/\text{s}$ e desvio-padrão de $30,98 \text{ m}^3/\text{s}$ nos dados observados e $11,71 \text{ m}^3/\text{s}$ de média e $25,95 \text{ m}^3/\text{s}$ de desvio-padrão nos dados simulados.

Os valores otimizados obtidos pela calibração, a partir do SWAT-CUP, constam na Tabela 5. Os valores que possuem operação de substituição são inseridos no modelo com base no seu valor real calibrado, porém os parâmetros que possuem como operação a adição e a multiplicação não são realizados dessa maneira, tendo em vista que os valores reais adotados para esses parâmetros, pelo modelo, dependem dos valores default iniciais do SWAT.

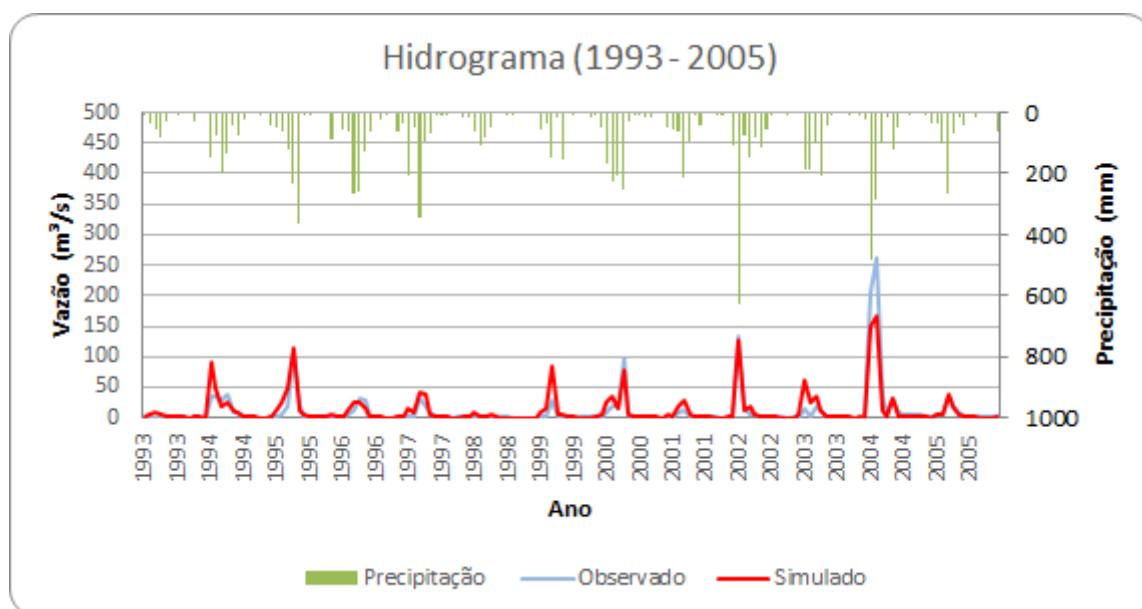


Figura 8 – Resultado do processo de calibração das vazões mensais da BHRP (1993–2005)

Tabela 5 – Parâmetros otimizados obtidos pela calibração no SWAT-CUP.

Parâmetros	Valor a ser inserido no SWAT
Alpha_Bf	0,4130
Biomix	0,2590
Canmx	4,3910
Cn2	0,0422
Ch_K2	3,1050
Ch_N2	0,2511
Epco	0,2050
Esco	0,6555
Revapmn	2,9900
Slsubbsn	-0,0535
Sol_Alb	-0,1335
Sol_Awc	0,1135
Sol_K	-0,1775
Sol_Z	0,1375
Surlag	9,5280

Com o objetivo de verificar se as vazões simuladas representaram bem a dinâmica hídrica da BHRP, realizou-se a validação do modelo (Fig. 9).

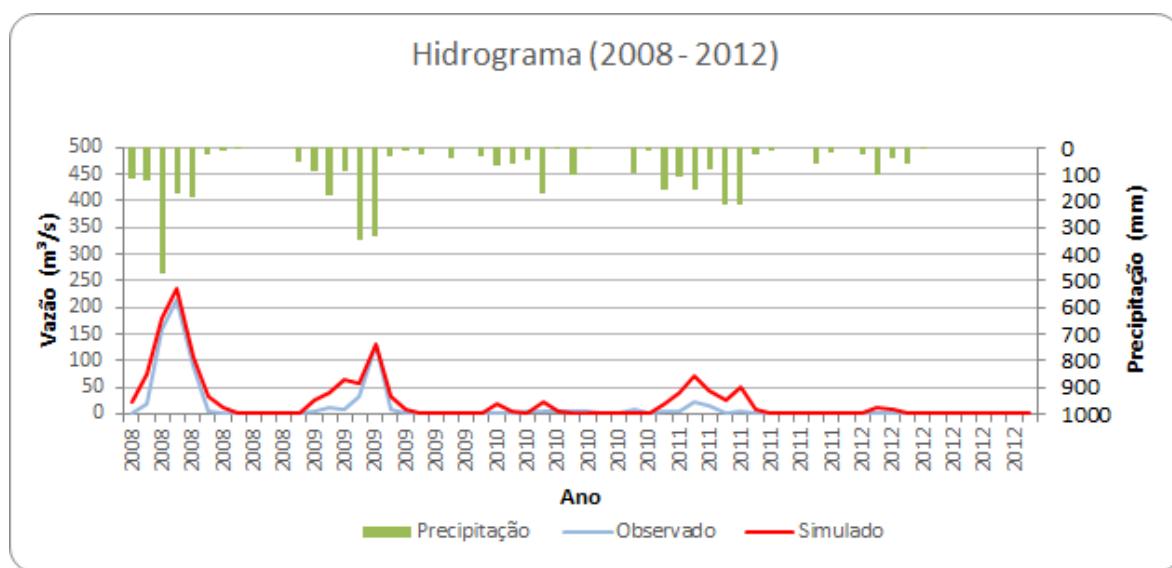


Figura 9 – Resultado do processo de validação das vazões mensais da BHRP para o período de 2008–2012.

A validação teve um desempenho muito bom, tanto em relação ao coeficiente de determinação, quanto em relação ao NSE, sendo 0,89 e 0,77, respectivamente, o que indica eficiência na simulação hidrológica em período diferente do calibrado.

5.2. Variabilidade da produção de sedimentos

No tocante à produção de sedimentos, em relação ao período utilizado para a calibração (1993–2005), tem-se uma média mensal de 16300 ton/ha, enquanto que, no período de validação, a média corresponde a 1155,58 ton/ha. Essa diferença decorre do fato de que o período de validação apresenta regime pluviométrico menos chuvoso do que o de calibração.

A Figura 10 demonstra a espacialização da produção de sedimentos em relação ao cenário atual pós-validação. Observa-se que a produção de sedimentos se concentra nas regiões sudeste e sudoeste da bacia, de maneira mais aproximada da nascente da BHRP. De fato, percebe-se que as regiões com maior produção de sedimentos são as de maior declividade, o que promove maiores velocidades no fluxo de escoamento do rio, promovendo uma menor sedimentação dos sedimentos erodidos. Resultados semelhantes foram encontrados por Abebe et al. (2022) em estudo realizado em bacia hidrográfica na Etiópia, a qual apresentou maiores produções de sedimentos na porção à montante da bacia e em regiões de declives acentuados. Também foi observado por Nagireddy et al. (2022) que o baixo curso da bacia do rio Nagavali era a região de menor produção de sedimentos.

Ainda da Figura 10, pode-se perceber que as áreas de maior declividade apresentam faixas de variação de produção de sedimentos elevada entre 101 – 200 ton/km²/ano e mais severas entre 201 – 601 ton/km²/ano, bem como que as áreas que apresentam a pastagem como uso e cobertura do solo apresentaram destaque nas taxas de produção de sedimentos.

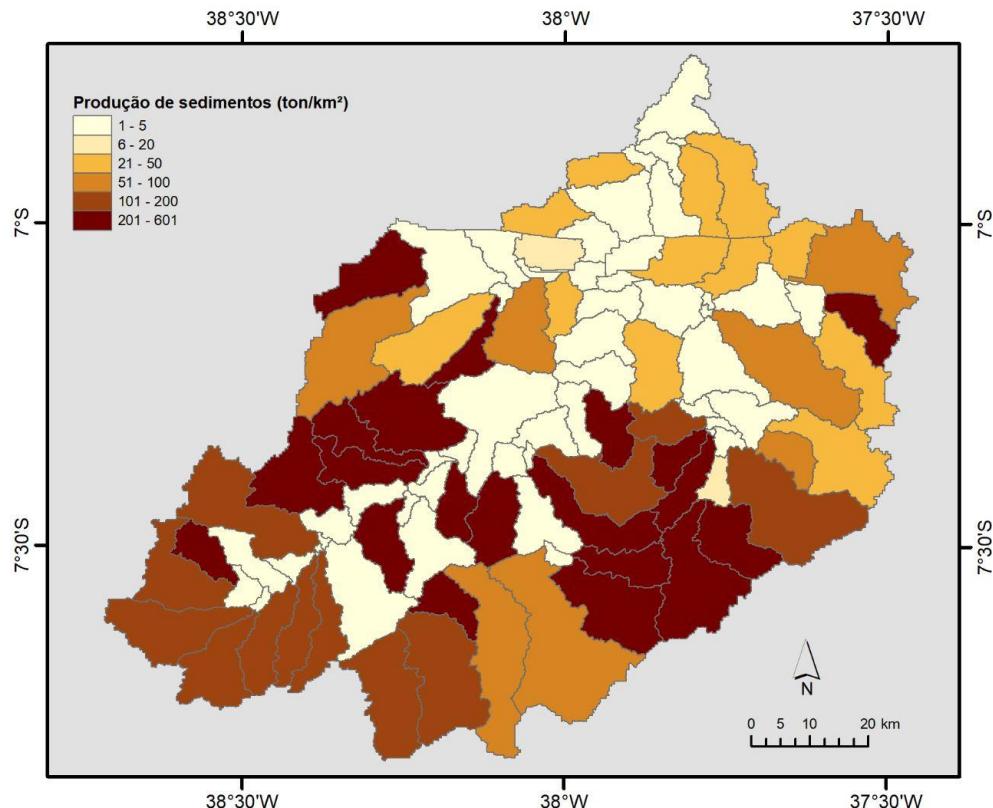


Figura 10 – Produção de sedimentos da BHRP no cenário atual após a validação.

5.3. Simulação hidro-meteorológica futura: análise de séries temporais de vazões e do clima futuro

De acordo com os dados pluviométricos utilizados na pesquisa, de acordo com o período de 1990 a 2010, a precipitação média anual é de 793,55 mm. Ao observar os cenários futuros, tem-se que a precipitação média anual corresponde a 571,67 mm no cenário otimista, e 382,74 mm no cenário pessimista. Portanto, percebe-se que, ao comparar com o cenário atual, houve uma diminuição de 221,88 mm no cenário otimista e 410,81 mm no cenário pessimista, correspondendo a reduções de 27,96% e 51,77% nos cenários otimista e pessimista, respectivamente. Orkodjo et al. (2022) obtiveram resultados semelhantes ao observar tendências de reduções na pluviometria em bacia na Etiópia, ao estudar os efeitos das mudanças climáticas sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 no período de 2017 – 2100.

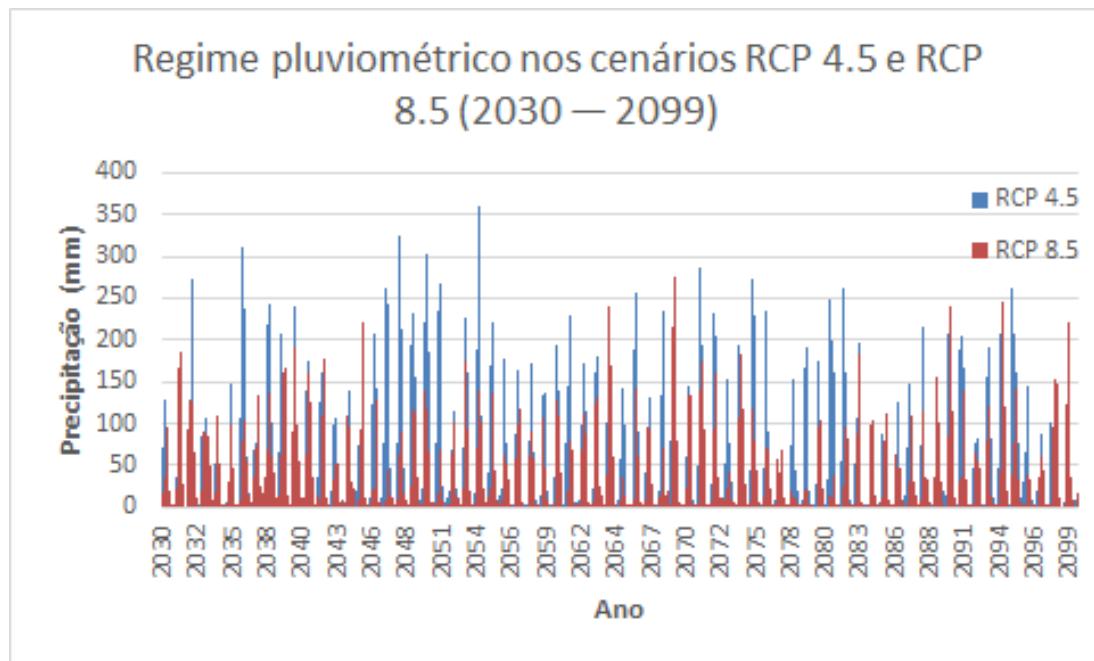


Figura 11 – Regime pluviométrico nos cenários futuros RCP 4.5 e RCP 8.5 no período de 2030 – 2099.

Com o modelo calibrado e validado, foram inseridos os geradores climáticos otimista e pessimista e então simuladas as vazões futuras (Fig.12).

A vazão média observada no cenário atual (1990 – 2010) corresponde a 10,12 m³/s, no entanto, percebe-se que as vazões médias para os cenários otimista e pessimista correspondem a 5,80 m³/s e 1,40 m³/s, respectivamente. Portanto, houve uma diminuição de 4,32 m³/s em relação ao cenário otimista e de 8,72 m³/s em relação ao cenário pessimista, correspondendo a reduções nas vazões de 42,69% e 86,17% nos cenários otimista e pessimista, respectivamente, em relação ao cenário atual, evidenciando o grande potencial das mudanças climáticas em intensificar as secas hidrológicas. Ho et al. (2022) chegaram a conclusões análogas, constatando reduções no escoamento superficial sob os cenários climáticos futuros RCP 4.5 e RCP 8.5, no período de 2050 – 2085, em bacia hidrográfica na Austrália, assim como Orkodjo et al. (2022) que também identificaram reduções no escoamento superficial nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 no período de 2017 – 2100.

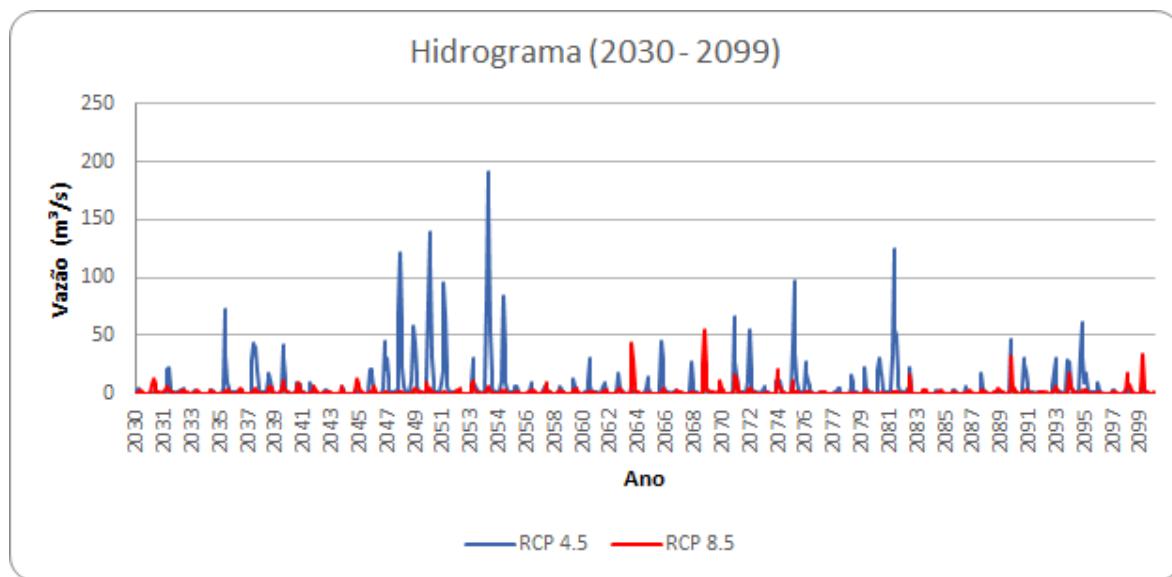


Figura 12 – Vazões futuras da BHRP de acordo com os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 (período de 2030–2099).

Além disso, percebe-se, pelas Figuras 11 e 12, que os anos de maior precipitação são seguidos por anos nos quais o volume de vazão apresenta picos, sobretudo no cenário otimista. Karakoyun et al. (2022) realizaram análises semelhantes ao constatar que os meses de pico na vazão eram precedidos de meses de alta pluviosidade.

5.4. Caracterização dos eventos de seca nos cenários futuros

Verifica-se nas Figuras 13, 14 e 15 que, no cenário otimista, os anos de seca mais crítica, em relação ao SDI-3, foram 2087 e 2098, com valor de SDI correspondendo a -0,41. Já em relação ao SDI-6, os anos mais secos foram 2030 e 2083, com SDI de -0,77. Ressalta-se que 2083 também foi o ano mais seco na escala de 9 meses (Out – Jun). Por fim, na escala de 12 meses, os anos mais secos foram 2030 e 2083. Percebe-se, portanto, que os anos secos foram semelhantes nas diversas escalas temporais utilizadas no estudo.

Em relação às sequências de anos apresentando eventos de seca, na escala de três meses (SDI-3), foram previstos dois longos períodos de seca com 8 anos de duração (2039–2046 e 2082–2089). De modo semelhante, nas escalas de 6, 9 e 12 meses, houve períodos prolongados de seca nos anos de 2082–2088 para o SDI-6 e 2082–2089 para os SDI-9 e 12. Além disso, as escalas de 9 e 12 meses registraram 10 anos de eventos de seca, compreendendo o período de 2055–2064. Tareke e Awoke (2023) também constataram em

sua pesquisa, em bacias hidrográficas na Etiópia, a existência de longos períodos de seca em cenários futuros, principalmente na classificação de secas moderadas.

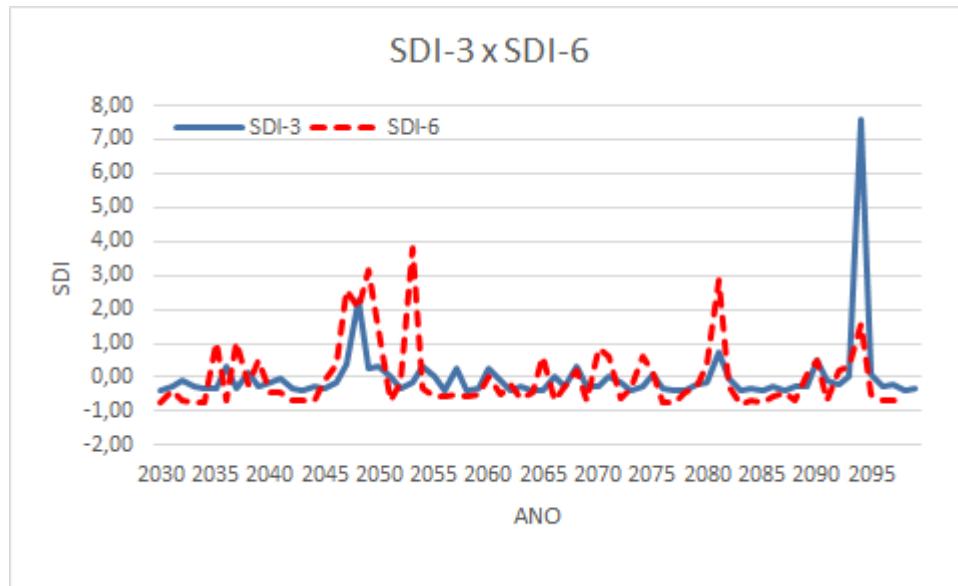


Figura 13 – SDI-3 e SDI-6 na BHRP no período de 2030–2099 no cenário otimista.

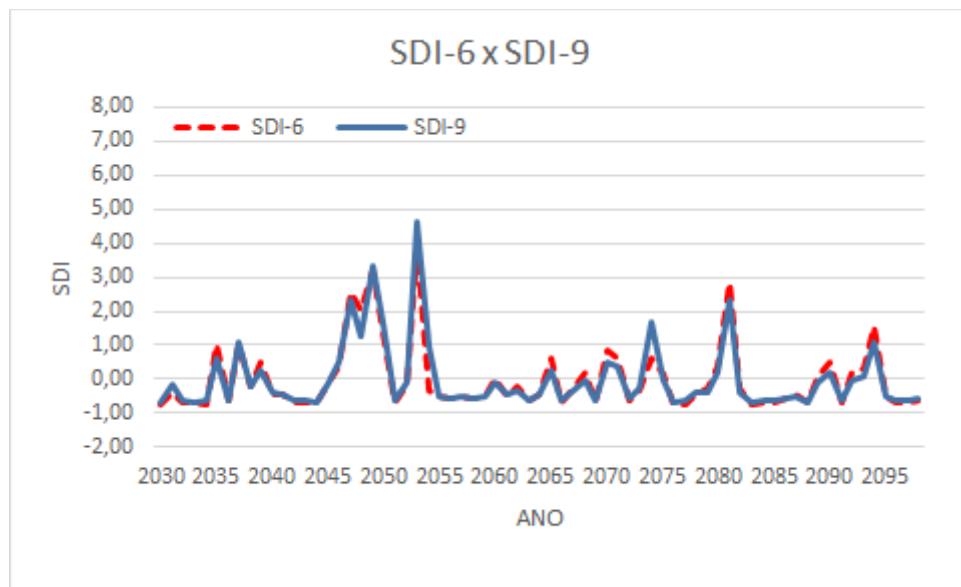


Figura 14 – SDI-6 e SDI-9 na BHRP no período de 2030–2099 no cenário otimista.

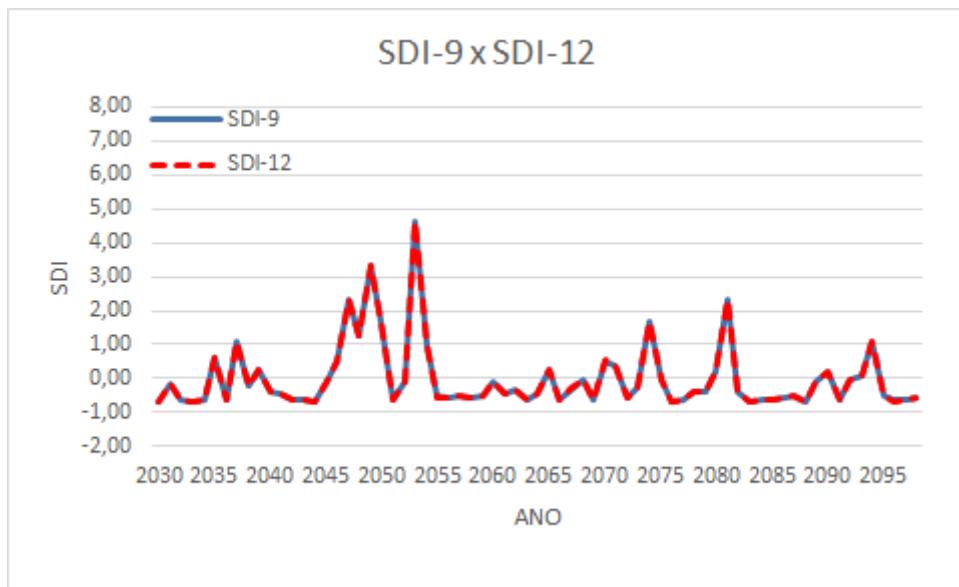


Figura 15 – SDI-9 e SDI-12 na BHRP no período de 2030–2099 no cenário otimista.

A partir da observação das Figuras 16, 17 e 18 percebe-se que, no cenário pessimista, o ano de 2077 foi o ano mais crítico em relação às escalas de 9 e 12 meses (SDI = $-0,85$). Ressalta-se também que, na escala de 12 meses, o ano de 2078 foi estimado como sendo igualmente crítico ($-0,85$). Na escala de 6 meses (SDI-6), o ano mais crítico apresentado foi 2080 (SDI = $-0,67$), enquanto que o SDI-3 apresentou diversos anos com o índice de seca na faixa de $-0,65$, sendo este o valor mais baixo apresentado, na escala de 3 meses, ocorrido nos anos 2077–2080, por exemplo. Logo, é possível perceber que os anos mais críticos relacionados aos eventos de seca não foram coincidentes nos diferentes cenários abordados (pessimista e otimista). Pode-se perceber que a tendência de ocorrência de secas é predominantemente na classe leve/moderada. Resultados semelhantes foram obtidos por Tareke e Awoke (2023), os quais concluíram que a frequência de secas em cenários futuros, no período de 2026 – 2099, é maior em relação a secas moderadas, em detrimento das secas severas e extremas.

Ainda nas Figuras 16, 17 e 18 nota-se que, na escala temporal SDI-3, houve um longo período de condições secas, correspondendo a 16 anos, englobando os anos de 2074–2089. Nas escalas de 9 e 12 meses, foram observados períodos coincidentes de 10 anos com eventos secos, correspondendo a 2053–2062.

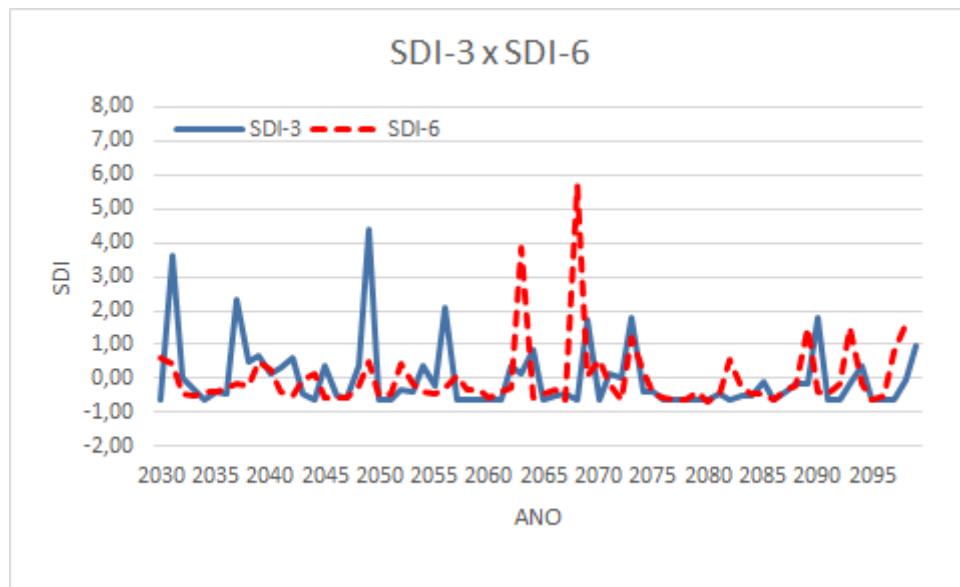


Figura 16 – SDI-3 e SDI-6 na BHRP no período de 2030–2099 no cenário pessimista.

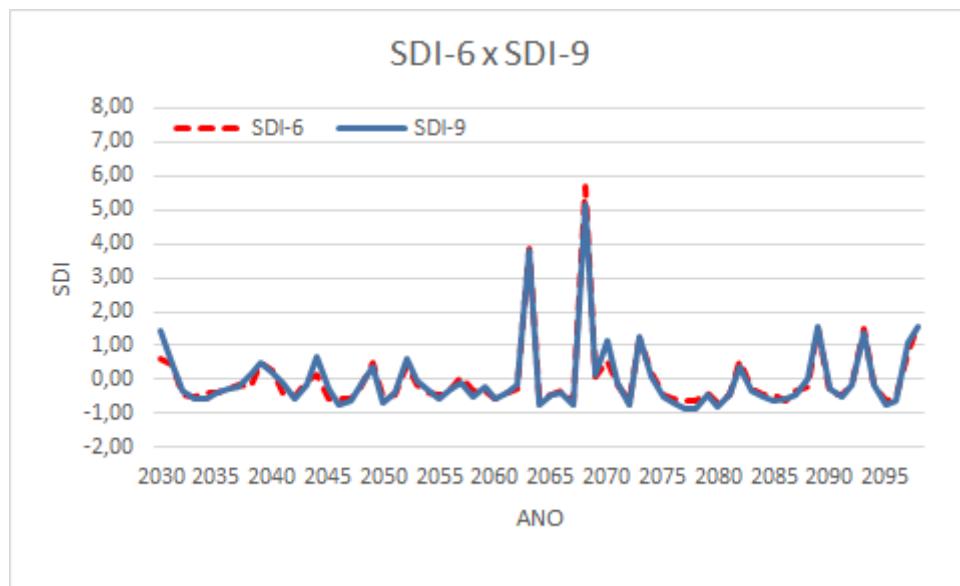


Figura 17 – SDI-6 e SDI-9 na BHRP no período de 2030–2099 no cenário pessimista.

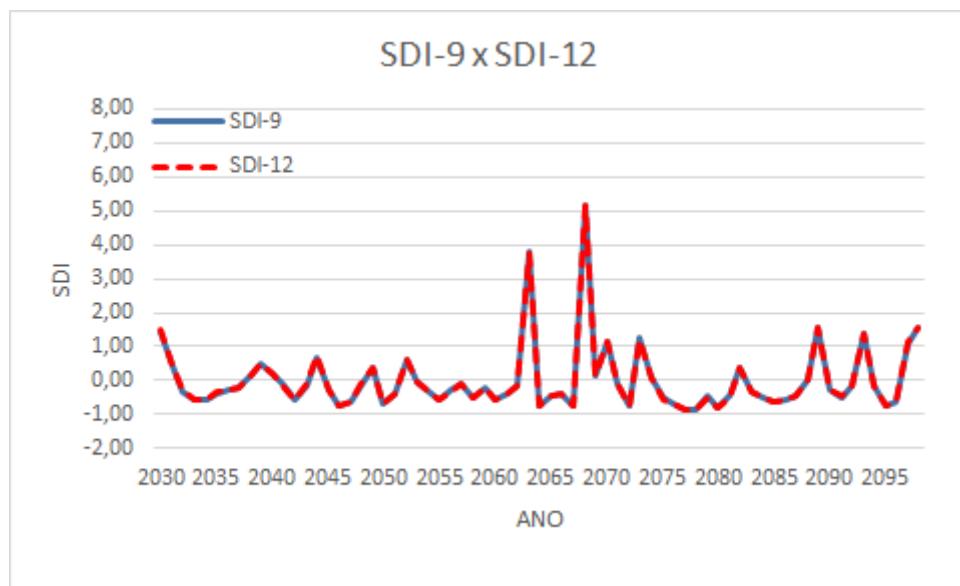


Figura 18 – SDI-9 e SDI-12 na BHRP no período de 2030–2099 no cenário pessimista.

A observação das Figuras 13 a 18 permite perceber que as curvas de SDI são discrepantes apenas quando comparados o SDI-3 e SDI-6. Esse resultado foi semelhante ao encontrado por Nalbantis e Tsakiris (2009), tendo em vista o regime hidrológico existente na região, o qual possui um curto período chuvoso, seguido de meses de condições secas.

A partir da Tabela 6, observa-se que no cenário otimista ocorreram mais eventos secos quando consideradas as escalas temporais de 9 (Out – Jun) e 12 meses (Out – Set). Em relação ao cenário pessimista, nota-se que a escala de 6 meses (Out – Mar) foi a que apresentou mais anos com eventos de seca.

Tabela 6 – Número de ocorrências de eventos secos entre os anos de 2030–2099.

CENÁRIO	SDI-3	SDI-6	SDI-9	SDI-12
Otimista	50	46	50	50
Pessimista	47	50	49	49

Na Tabela 7, estão dispostas as frequências de ocorrência de eventos de seca hidrológica na BHRP no período de 2030–2099, nos cenários otimista e pessimista. Observa-se que há uma alta frequência de ocorrência de eventos de seca em ambos os cenários estudados, com mais de 65% dos anos do período estudado com eventos de secas

em todas as escalas temporais, apresentando destaque, no cenário otimista, em relação ao SDI-9 e 12, os quais apresentam, respectivamente, 72,42% e 72,46% dos anos do período com eventos de seca hidrológica. Em relação ao cenário pessimista, o SDI-6 demonstrou que 72,46% dos anos do período experimentariam a ocorrência de condições secas.

Tabela 7 – Frequência de ocorrência de eventos secos (2030–2099).

CENÁRIO	SDI-3	SDI-6	SDI-9	SDI-12
Otimista	0,7143	0,6667	0,7242	0,7246
Pessimista	0,6714	0,7246	0,7101	0,7101

Além disso, pode-se perceber que a maior parte dos anos, no período de referência (2030 – 2099), apresentou condições secas tanto no cenário otimista quanto no cenário pessimista, em todas as escalas temporais estudadas.

Tabela 8 – Matriz de transição dos eventos de seca hidrológica 2030–2099, referente ao cenário pessimista.

Índices	SDI-3	SDI-6	SDI-9	SDI-12
SDI-3	74,47%	74,47%	74,47%	74,47%
SDI-6	-	76,00%	96,00%	96,00%
SDI-9	-	-	77,55%	100,00%
SDI-12	-	-	-	77,55%

A partir da Tabela 8, é possível observar os percentuais de transição dos eventos de seca ocorridos em um ano para o ano posterior, correspondentes ao cenário pessimista em estudo. Percebe-se, por exemplo, que os eventos de seca, quanto ao SDI-3, propagaram-se para o ano seguinte em 74,47% dos anos em estudo, assim como, os eventos de SDI-9 e SDI-12 se propagaram ambos, para o ano seguinte, em 77,55% dos anos em estudo.

Ainda da Tabela 8, é possível observar a transição dos eventos de seca, no mesmo ano hidrológico, no cenário pessimista. Por exemplo, nota-se que, ocorrido um evento de seca relativo ao acumulado de 9 meses (SDI-9) em um ano hidrológico, a transição para um evento seco relacionado ao SDI-12 ocorreu em todos os anos (100%). Do mesmo modo, percebe-se que, ocorrido um evento de seca referente ao SDI-6, em 96% dos anos em estudo, também ocorreu evento de seca relacionado ao SDI-9 e SDI-12 no respectivo ano hidrológico.

Em relação ao Cenário Otimista (Tab. 9), pode-se verificar que os percentuais de propagação de um evento de seca para o ano seguinte, na mesma escala temporal, foram menores no cenário otimista, quando comparados com os referentes ao cenário pessimista. Observa-se que a propagação do SDI-6, de um ano para o ano posterior, foi de apenas 69,56%, expressando uma menor taxa do que as demais escalas em estudo.

Tabela 9 – Matriz de transição dos eventos de seca hidrológica 2030–2099, referente ao cenário otimista.

Índices	SDI-3	SDI-6	SDI-9	SDI-12
SDI-3	72,00%	76,00%	76,007%	80,00%
SDI-6	-	69,56%	97,82%	97,82%
SDI-9	-	-	76,00%	100,00%
SDI-12	-	-	-	76,00%

Em relação à evolução dos eventos de seca nas diferentes escalas temporais, percebe-se que, de maneira análoga ao cenário pessimista, em todos os anos que ocorreram secas quanto ao SDI-9, também foram observadas condições secas na escala de 12 meses (Out – Set). Além disso, pode-se notar que dada a ocorrência de um evento de seca na escala de 6 meses (SDI-6), também ocorreram eventos de seca nas escalas de 9 e 12 meses em 97,82% dos anos em estudo. Logo, conclui-se que, na BHRP, no período de 2030–2099, se o índice SDI apresenta condições secas na escala de 6 meses (Out – Mar) em dado ano hidrológico, existe grande probabilidade daquele ano também apresentar secas hidrológicas nas escalas de 9 e 12 meses, em ambos os cenários estudados.

5.5. Dinâmica da produção de sedimentos referente às secas hidrológicas futuras

A partir da Figura 19, observa-se que a produção de sedimentos apresentou bastante redução no cenário RCP 8.5 (pessimista), com média de 31,28 ton/ha/mês, enquanto que, no cenário otimista, a média foi de 231,76 ton/ha/mês. Nota-se, portanto, que houve uma redução de 86,5% no cenário pessimista em comparação ao otimista.

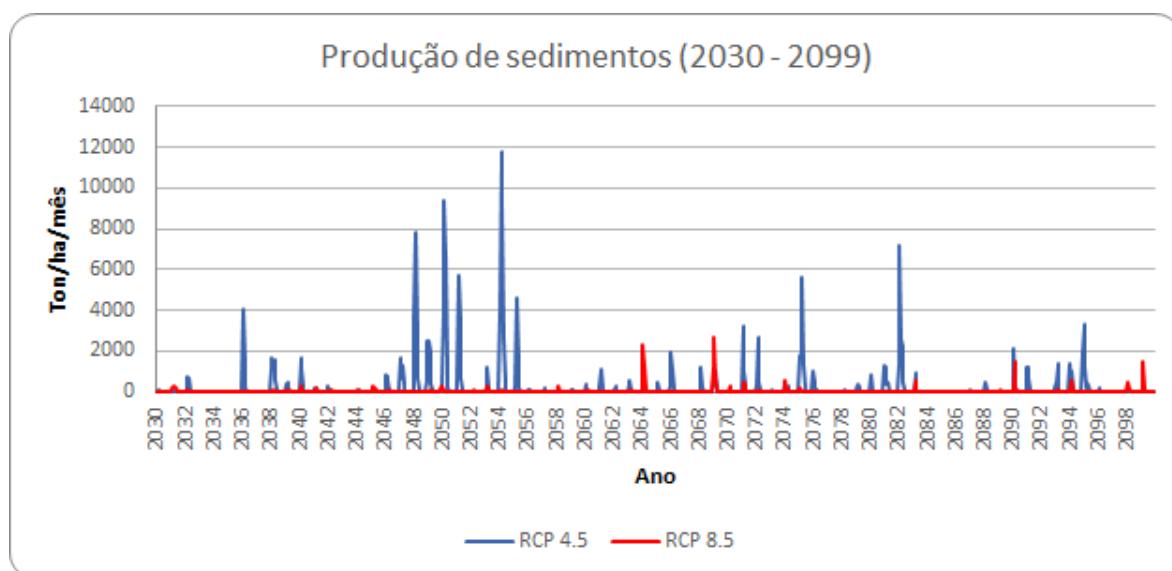


Figura 19 – Produção de sedimentos futura da BHRP de acordo com os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 (2030–2099).

A partir da observação das figuras 12 e 19, percebe-se a semelhança dos picos entre o escoamento superficial e a produção de sedimentos em cenários futuros na BHRP. Esse resultado encontra semelhança nos estudos realizados por Karakoyun et al. (2022), os quais demonstraram a forte correlação entre as dinâmicas de vazão e produção de sedimentos, bem como indicaram que o escoamento superficial é melhor que a precipitação como fator de influência no fenômeno da produção de sedimentos.

Em relação aos quantitativos anuais, no cenário otimista, a menor produção anual de sedimentos foi identificada no ano de 2084, sendo esse ano englobado no período no qual foram identificados longos eventos de seca neste cenário (2082 – 2088), ressaltando-se que essa produção de sedimentos mínima ocorreu no ano seguinte ao ano mais seco (2083) observado nos eventos de seca hidrológica de 6, 9 e 12 meses. Em relação ao

cenário pessimista, o ano com menor produção de sedimentos foi 2030, não coincidindo, portanto, com os anos críticos de seca hidrológica observados nesse cenário.

O cenário otimista apresentou uma produção de sedimentos máxima no ano de 2054, correspondendo a 27.899,747 ton/ha/ano, e, ao analisar a série de dados do SDI, observa-se que o ano de 2054 foi precedido de um intervalo de anos com condições bastante úmidas. Enquanto que, no cenário pessimista, o máximo ocorreu em 2069, sendo 4.869,59 ton/ha/ano, percebe-se que 2069 foi um ano em que não ocorreram eventos de seca em nenhuma das escalas em estudo.

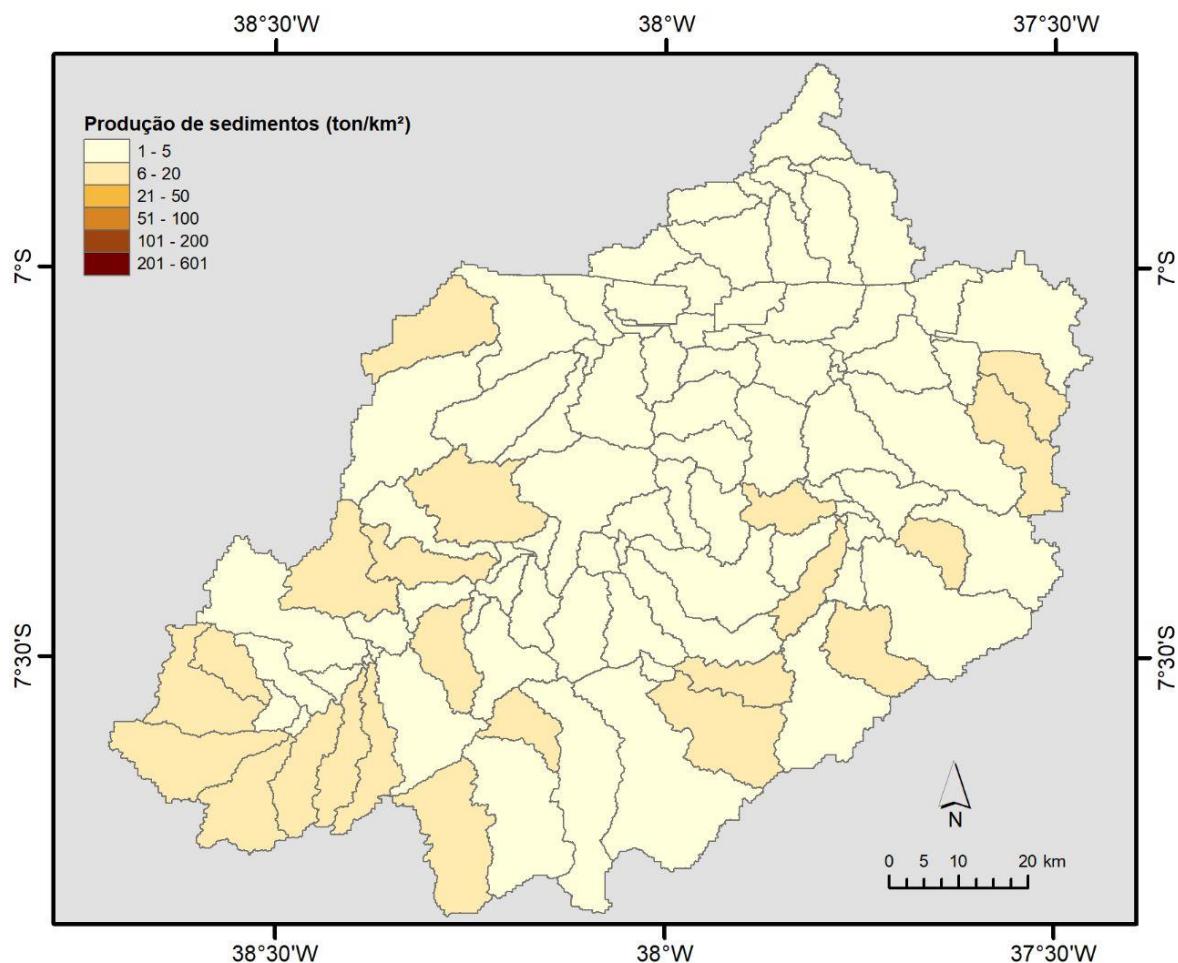


Figura 20 – Mapa da produção de sedimentos da BHRP, de acordo com o cenário pessimista de emissões RCP 8.5 (2030–2099).

Em relação à espacialização da produção de sedimentos, foram elaborados os mapas de produção de sedimentos (Figuras 20 e 21). No cenário pessimista (Figura 20), observa-se uma drástica redução da produção de sedimentos nas sub-bacias simuladas da BHRP, quando comparado com o cenário atual e com o cenário futuro otimista, com

maiores concentrações na porção sudoeste, sendo esta referente à nascente. Observa-se que, em razão da redução do volume de escoamento ocasionada no cenário RCP 8.5, em decorrência de menores índices pluviométricos e maiores taxas de evaporação, a vazão do rio torna-se reduzida, o que intensifica o assoreamento do rio, diminuindo a produção de sedimentos ao longo da BHRP.

Em relação ao cenário otimista (Figura 21), percebe-se uma maior espacialização da produção de sedimentos, quando comparada com a do cenário pessimista. Novamente, concentrada na nascente da BHRP. Por fim, foi calculado o aporte de sedimentos no exutório da BHRP em relação ao período de projeções futuras (2030–2099). A partir da Figura 22, pode-se perceber a superioridade do aporte de sedimentos no exutório da bacia estudada quando comparados os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. No cenário otimista, o total de sedimentos no exutório foi de 295.872,061 toneladas, enquanto no cenário pessimista foi de 67.530,7976.

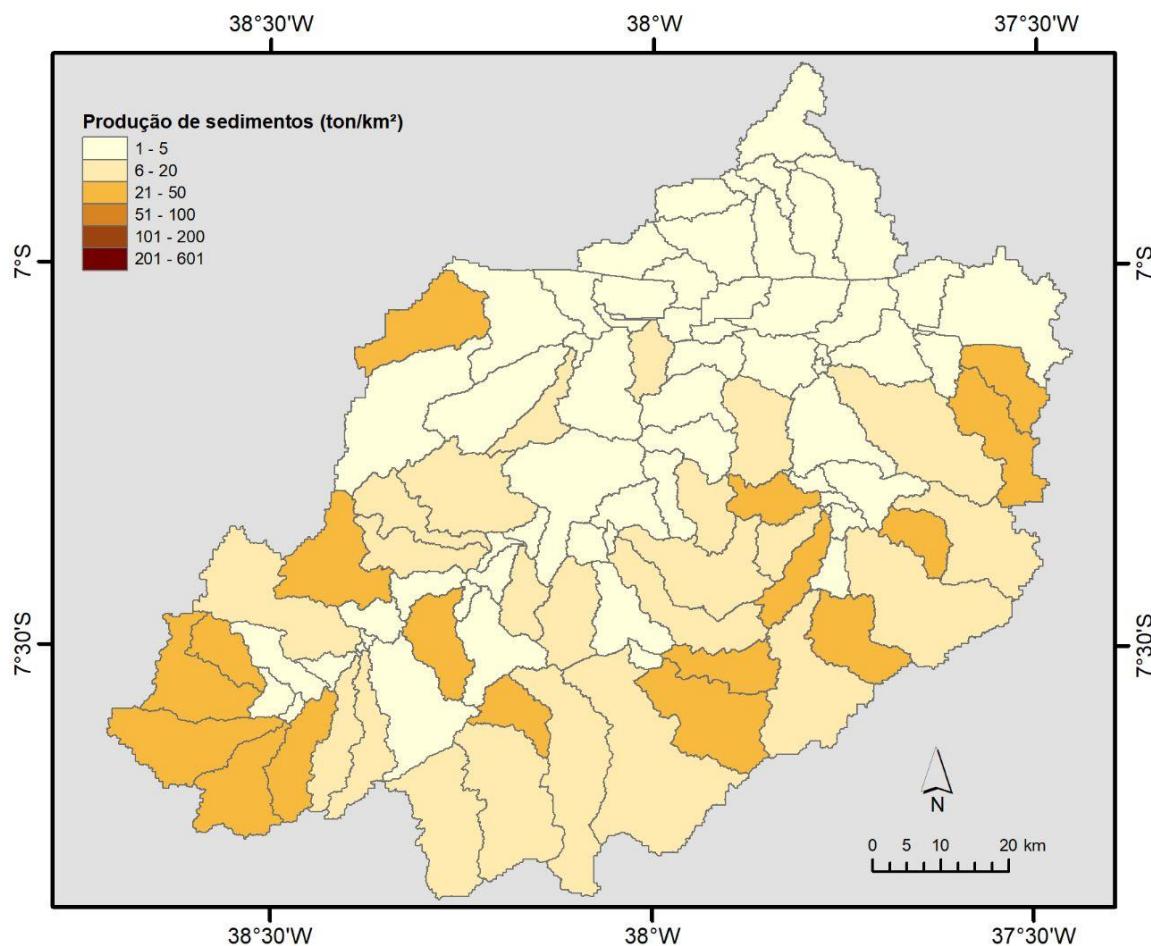


Figura 21 – Mapa da produção de sedimentos da BHRP, de acordo com o cenário otimista de emissões RCP 4.5 (2030–2099).

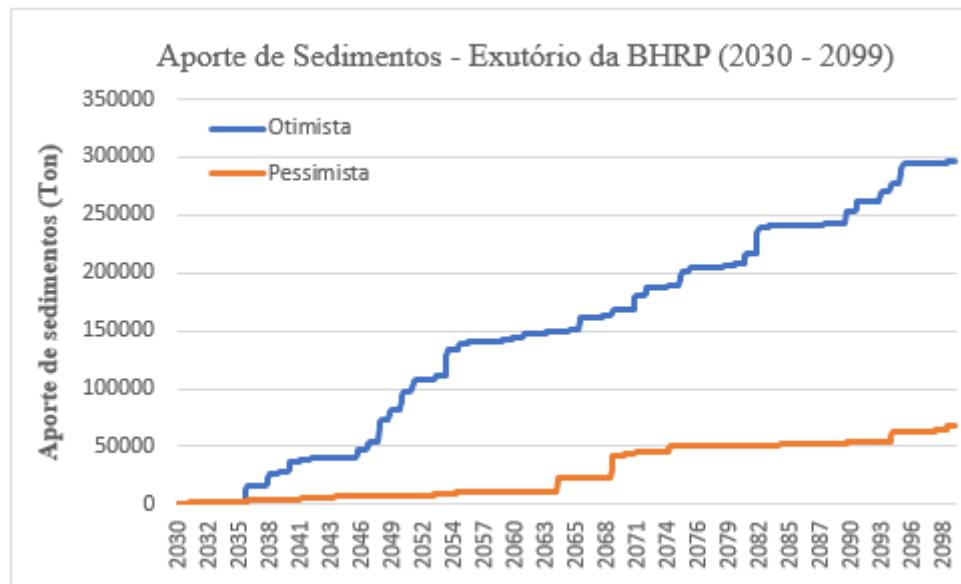


Figura 22 – Aporte de sedimentos no exutório da BHRP, de acordo com os cenários otimista (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5) de emissões de GEE (2030–2099).

6. CONCLUSÃO

A bacia hidrográfica do Rio Piancó está localizada na região semiárida brasileira, sendo esta região caracterizada por chuvas escassas e constante estresse hídrico. As mudanças climáticas causadas pela elevação dos padrões de consumo humano e aumento nas emissões de gases do efeito estufa possuem potencial de reduzir os índices pluviométricos mundialmente, além de aumentar as taxas de evaporação, o que ocasionará redução no escoamento superficial dos rios, intensificando ainda mais as problemáticas relacionadas à gestão dos recursos hídricos.

Neste estudo, a modelagem apresentou um ótimo desempenho na calibração do modelo ($R^2 = 0,83$ e $NSE = 0,82$), a partir de 15 parâmetros relacionados à dinâmica hídrica da bacia hidrográfica, com base no período de referência de 1993–2005. Realizou-se também a validação do modelo, no período de 2008–2012, a qual apresentou desempenho muito bom ($R^2 = 0,89$ e $NSE = 0,77$).

De acordo com os cenários climáticos RCP 4.5 (otimista) e RCP 8.5 (pessimista), conforme a modelagem realizada pelo modelo SWAT, perceberam-se reduções de volume de vazão da ordem de -42,69% e -86,17% nos cenários otimista e pessimista, respectivamente, em relação ao cenário atual. Já em relação à produção de sedimentos, houve redução de -86,5%, quando comparados os cenários futuros estudados.

Em relação às secas hidrológicas, no cenário otimista, os anos de seca mais crítica, em relação ao SDI-3, foram 2087 e 2098. Já em relação ao SDI-6, os anos mais secos foram 2030 e 2083. O ano de 2083 também foi o ano mais seco na escala de 9 meses. Já na escala de 12 meses, os anos mais secos foram 2030 e 2083. No cenário pessimista, o ano de 2077 foi o ano mais crítico em relação às escalas de 9 e 12 meses. Na escala de 6 meses (SDI-6), o ano mais crítico apresentado foi 2080, enquanto que o SDI-3 apresentou diversos anos com o índice de seca na faixa de -0,65. Portanto, percebeu-se que os anos mais críticos relacionados aos eventos de seca não foram coincidentes nos diferentes cenários abordados (pessimista e otimista). Além disso, verificou-se também a ocorrência de longos períodos de seca em todas as escalas temporais utilizadas.

A matriz de transição demonstrou a alta probabilidade de ocorrência de eventos de seca ocorrida em anos sucessivos, além de demonstrar a progressão das secas nas diferentes escalas temporais (3, 6, 9 e 12 meses) em cada ano hidrológico.

Em relação à produção de sedimentos, percebeu-se a íntima relação das ocorrências de seca hidrológica com a variação do quantitativo da produção de sedimentos, com

redução significativa do aporte de sedimentos no exutório quando comparados os cenários em estudo. Por fim, espacialmente, percebeu-se uma concentração da produção de sedimentos na porção referente à nascente da BHRP.

Conclui-se que as mudanças climáticas possuem grande impacto no volume de escoamento das bacias hidrográficas, ocasionando futuramente episódios mais recorrentes de secas hidrológicas, o que impacta diretamente na produção de sedimentos e assoreamento de rios. Sendo necessária, portanto, um melhor gerenciamento dos recursos hídricos, com vistas a reduzir as problemáticas relacionadas à escassez hídrica, sobretudo em regiões que já enfrentam esse problema.

Como recomendações futuras, sugere-se que sejam utilizados dados de postos fluviométricos localizados à jusante dos grandes reservatórios localizados na bacia hidrográfica em estudo, para que sejam analisados os efeitos da regularização de vazões no fenômeno das secas hidrológicas em cenários futuros. Além disso, como forma de obter uma melhor compreensão dos processos hidrossedimentológicos na bacia em estudo, sugere-se a realização da projeção do uso e cobertura do solo futuros. Por fim, com o objetivo de obter detalhamento robusto do ciclo hidrológico, sugere-se que sejam avaliados os comportamentos futuros de variáveis como temperatura e evapotranspiração.

7. REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR K.C., ROUHOLAHNEJAD E., VAGHEFI S., SRINIVASAN R., YANG H. e KLØVE, B. 2015. **A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model.** *J. Hydrol.*, **524**, 733–752. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.027.
- ABBASPOUR K.C., YANG J., MXIMOV I., SIBER R., BOGNER K., MIELEITNER J., ZOBRIST J. e SRINIVASAN R. 2007. **Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT.** *Journal of Hydrology*, **333**, 413- 430.
- ABEBE B.K., ZIMALE F.A., GELAYE K.K., GASHAW T., DAGNAW E.G., ADEM A.A. 2022. **Application of Hydrological and Sediment Modeling with Limited Data in the Abbey (Upper Blue Nile) Basin, Ethiopia.** *Hydrology*, **9**, 167. doi:10.3390/hydrology9100167.
- ALNAHIT A.O., MISHRA A.K. e KHAN A.A. 2020. **Evaluation of high-resolution satellite products for streamflow and water quality assessment in a Southeastern US watershed.** *Journal of Hydrology*, **27**: 100660, 1–18. doi: 10.1016/j.ejrh.2019.100660.
- ANA. Agência Nacional de Águas. 2016. **Plano de recursos hídricos Piancó-Piranhas-Açu.**
- ANA. Agência Nacional de Águas. 2021. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos.** Disponível em: < <http://www.snirh.gov.br/> >. Acesso em: 5 de abr. 2021.
- ANA. Agência Nacional de Águas. 2023. **Sistema Hídrico Curema-Mãe D'Água e Rios Piancó e Piranhas.** Disponível em: < <https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/acudes-do-semiarido/sistema-curema-mae-dagua> >. Acesso em: 1 de fev. 2023.
- ARNELL N.W., LOWE J.A., BROWN S., GOSLING S.N., GOTTSCHALK P., HINKEL J., LLOYD-HUGHES B., NICHOLLS R.J., OSBORN T.J., OSBORNE T.M., ROSE G.A., SMITH P. e WARREN R.F. 2013. **A global assessment of the effects of climate policy on the impacts of climate change.** *Nat. Clim. Chang* **3**, 512–519.
- ARNOLD J.G. e FOHRER N. 2005. **SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling.** *Hydrol. Processes*, **19**(3), 563–572. doi: 10.1002/hyp.5611
- ARNOLD J.G., SRINIVASAN R., MUTTIAH R.S. e WILLIAMS J.R. 1998. **Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development.** *Journal of the American Water Resources Association*, **34**(1), 73–89. doi: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.

ASMAMAW L.B. e MOHAMMED A.A. 2019. **Identification of soil erosion hotspot areas for sustainable land management in the Gerado catchment, North-eastern Ethiopia.** *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.*, **13**, 306–317.

BATES B. C., KUNDZEWICZ Z.W., Wu S. e PALUTIKOF J.P. 2008. **Climate change and water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Geneva: IPCC Secretariat, 210 pp.

BEVEN K. **Infiltration, soil moisture, and unsaturated flow.** In: Bowles D.S.; O'Connell P.E. **Recent advances in the modeling of hydrologic systems.** 1. ed. Dordrecht, Boston e Londres, Kluwer Academic Publishers, Cap. 7, pp. 137-151. (Series C: Mathematical and Physical Sciences, 345).

BHUIYAN C. 2004. **Various drought indices for monitoring drought condition in Aravalli Terrain of India.** Anais da XX Conferência ISPRS. Sensoriamento Remoto de Fotogrametria da Sociedade Internacional, Istambul, 2004.

BLANCO-GÓMEZ P., JIMENO-SÁEZ P., SENENT-APARICIO J. e PÉREZ-SÁNCHEZ J. 2019. **Impact of Climate Change on Water Balance Components and Droughts in the Guajoyo River Basin (El Salvador).** *Water*, **11**:2360, 1–18. doi: 10.3390/w11112360.

BOUDAD B., SAHBI H. e MANSSOURI I. 2018. **Analysis of meteorological and hydrological drought based in SPI and SDI index in the Inaouen Basin (Northern Morocco).** *J. Mater. Environ. Sci.*, **9**, 219-227. doi: 10.26872/jmes.2018.9.1.25.

BRANCO A.O.T.C. 2017. **Análise da Conectividade da paisagem no baixo curso do Rio Piancó-Pombal-Semiárido Paraibano.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Paraíba, Brasil.

BRASIL NETO R.M., SANTOS C.A.G., NASCIMENTO T.V.M., SILVA R.M. e SANTOS C.A.C. 2020. **Evaluation of the TRMM product for monitoring drought over Paraíba state, Northeastern Brazil: A statistical analysis.** *Remote sensing*, **12**: 2184, 1 – 24. doi: 10.3390/rs12142184.

BRIGHENTI T.M. 2015. **Modelagem hidrológica e avaliação de diferentes métodos de calibração para o modelo SWAT.** Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

BRITO C. S., SILVA R.M., SANTOS C.A.G., BRASIL NETO R.M. e COELHO V. H. R. 2021. **Monitoring meteorological drought in a semiarid region using two long-term satellite-estimated rainfall datasets: A case study of the Piranhas River basin, northeastern Brazil.** *Atmospheric Research*, v. **250**, p. 105380.

CCGE. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. 2014. **Estudos relativos às mudanças climáticas e recursos hídricos para embasar o plano nacional de adaptação às mudanças climáticas: Eixo I - Cenários de mudanças para estudos de adaptação no setor de recursos hídricos.** Fortaleza/CE.

CHAKRAPANI G.J. e SUBRAMANIAN V. 1993. **Rates of erosion and sedimentation in the Mahanadi river basin, India.** *Journal of Hydrology*, **149** (1–4), 39-48.

CHOU S.C, LYRA A., MOURÃO C., DERECZYNSKI C., PILOTTO I., GOMES J., BUSTAMANTE J., TAVARES P., SILVA A., RODRIGUES D., CAMPOS D., CHAGAS D., SUEIRO G., SIQUEIRA G., NOBRE P. e MARENKO J. 2014. **Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models.** *American Journal of Climate Change*, **3**, 438-454. doi:10.4236/ajcc.2014.35039.

CHOU S.C, LYRA A., MOURÃO C., DERECZYNSKI C., PILOTTO I., GOMES J., BUSTAMANTE J., TAVARES P., SILVA A., RODRIGUES D., CAMPOS D., CHAGAS D., SUEIRO G., SIQUEIRA G. e MARENKO J. 2014. **Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios.** *American Journal of Climate Change*, **3**, 512-527. doi: 10.4236/ajcc.2014.35043.

DANTAS L.G., SANTOS C.A.C., OLINDA R.A., BRITO J.I.B., SANTOS C.A.G., MARTINS E.S.P.R., OLIVEIRA G. e BRUNSELL N.A. 2020. **Rainfall prediction in the state of Paraíba, Northeastern Brazil using generalized additive models.** *Water*, **12**: 2478, 1–26. doi: 10.3390/w12092478.

DANTAS J.C., SILVA R.M. e SANTOS C.A.G. 2020. **Drought impacts, social organization and public policies in northeastern Brazil: A case study of the Upper Paraíba River basin.** *Environmental Monitoring and Assessment*, v. **192**, p. 317.

DHAR S. e MAZUMDAR A. 2009. **Hydrological modelling of the Kangsabati river underchanged climate scenario: case study in India.** *Hydrol. Process.*, **23**, 2394–2406. doi: 10.1002/hyp.7351.

Djebou D.C.S. 2019. **Streamflow drought interpreted using SWAT model simulations of past and future hydrologic scenarios: application to Neches and Trinity River Basins, Texas.** *J. Hydrol. Eng.*, **24**(9): 05019024, 1–12. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001827.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1979. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da X reunião Técnica de Levantamento de Solos.** Miscelânea 1, Rio de Janeiro: 1979, 83 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2021. **Ageitec – Agência Embrapa de Informação Tecnológica.** Disponível em: < <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/> >. Acesso em: 8 de ago. de 2021.

ESHETE D., RIGLER G., SHINSHAW B., BELETE A. e BAYEH B. 2022. **Evaluation of streamflow response to climate change in the data-scarce region, Ethiopia.** *Sustainable Water Resources Management*, **8**:187. doi: 10.1007/s40899-022-00770-6.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United States. **Mapa Mundial Digital de Solos.** Disponível em: <

<https://data.apps.fao.org/map/catalog/srv/eng/catalog.search#/metadata/446ed430-8383-11db-b9b2-000d939bc5d8> >. Acesso em: 14 de ago. de 2021.

GAO L. e ZHANG Y. 2016. **Spatio-temporal variation of hydrological drought under climate change during the period 1960–2013 in the Hexi Corridor, China.** *J Arid Land*, **8**(2), 157–171. doi: 10.1007/s40333-015-0022-3.

Governo de Odisha. 2004. **Relatório de Desenvolvimento Humano 2004 Orissa.** Publicado pelo Departamento de Planejamento e Coordenação, Governo de Odisha, Bhubaneswar, 1–326.

HAILE G.W. e FETENE M. 2012. **Assessment of soil erosion hazard in Kilie catchment, East Shoa, Ethiopia.** *Land Degrad. Dev.*, **23**, 293–306.

HANNAFORD J., LLOYD-HUGHES B., KEEF C., PARRY S. e PRUDHOMME C. 2011. **Examining the large-scale spatial coherence of European drought using regional indicators of precipitation and streamflow deficit.** *Hydrol. Process.*, **25** (7), 1146–1162. doi: org/10.1002/hyp.7725.

HAYES M., WILHITE D., SVOBODA M. e TRNKA M. 2011. **Investigating the connections between climate change, drought, and agricultural production.** Dinar, A., Mendelsohn, R.O. (Eds.), *Manual sobre Mudança Climática e Agricultura*. Publicação Edward Elgar, 73–86.

HEIDARIZADI Z., JAMALI Z. 2022. **Future Changes in Dry Conditions using Statistical Downscaling Model (SDSM) in the Western Region of Gorgan Plain, Iran.** *Arid Ecosystems*, **12**, 345–352.

HO M., NATHAN R., WASKO C., VOGEL E. e SHARMA A. 2022. **Projecting changes in flood event runoff coefficients under climate change.** *Journal of Hydrology*, **615**: 128689, 1–15. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128689.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010. **Censo Demográfico 2010.** Disponível em: < <http://www.censo2010.ibge.gov.br/> >. Acesso em: 07 mar. 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2021. **EMBRAPA - Mapa de Solos do Brasil.** Rio de Janeiro: IBGE, 2001 - Escala 1:5.000.000. Disponível em: < http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/mapa_solos.php >. Acesso em: 24 de abril de 2021.

India-WRIS. 2015. **India-WRIS. Water resources information system of India.** Disponível em: < <https://indiawris.gov.in/wris/#/> >. Acesso em: 25 ago. 2021.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. 2021. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.** 2021. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep> >. Acesso em: 21 de mar. 2021.

INPE. 2021. **Projeções climáticas no Brasil.** Disponível em: <http://www.pclima.inpe.br/como-consultar/>. Acesso em: 01 de set. 2021.

IPCC. 2007. **Fourth Assessment Report: Climate Change 2007.** Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press.

IPCC. 2014. América Central e do Sul. **Mudanças climáticas 2014: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade. Parte B: Aspectos Regionais; Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas;** Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA; pp. 1499–1566.

IPCC. 2018. **Anexo I: Aquecimento Global de 1,5°C.** Um relatório especial do IPCC sobre os impactos do aquecimento global de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais e cenários de emissão global de gases de efeito estufa relacionados, no contexto do fortalecimento da resposta global à ameaça da mudança climática, desenvolvimento sustentável e esforços para erradicar a pobreza. Masson-Delmotte, V. et al. In Press.

JHA M., GASSMAN P. W., SECCHI S., GU R., ARNOLD J. 2004. **Effect of Watershed Subdivision on SWAT Flow, Sediment, And Nutrients Predictions.** *Journal of the American Water Resources Association*, **40**(3): 811-825.

KARAKOYUN E., KAYA N. 2022. **Hydrological simulation and prediction of soil erosion using the SWAT model in a mountainous watershed: a case study of Murat River Basin, Turkey.** *Journal of Hydroinformatics*, **24** (6), 1175. doi: 10.2166/hydro.2022.056.

KIM J-S., PARK S-Y., HONG H-P., CHEN J., CHOI S-J., KIM T-W. e LEE J-H. 2020. **Drought risk assessment for future climate projections in the Nakdong River Basin, Korea.** *Int J Climatol.*, **40**, 4528–4540. doi: 10.1002/joc.6473.

KLEIN R.J.T., ERIKSEN S.E.H., NAESS L.O., HAMMILL A., TANNER T.M., ROBLEDO C. e O'BRIEN L. 2007. **Portfolio screening to support the mainstreaming of adaptation to climate change into development assistance.** *Climatic Change*, **84**: 23–44. doi: 10.1007/s10584-007-9268-x.

LELIS T.A. 2011. **Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na bacia do ribeirão São Bartolomeu, Zona da Mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT.** Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

LEŠČEŠEN I., DOLINAJ D., PANTELIC M., TELBISZ T. e VARGA, G. 2020. **Hydrological drought assessment of the Tisza River.** *J. Geogr. Inst. Cvijic.*, **70**(2), 89–100. doi: 10.2298/IJGI2002089L.

LI L., NI J., CHANG F., YUE Y., FROLOVA N., MAGRITSKY D., BORTHWICK A.G.L., CIAIS P., WANG Y., ZHENG C. e WALLING D. E. 2020. **Global trends in**

water and sediment fluxes of the world's large rivers. *Science Bulletin*, **65**, 62–69. doi: 10.1016/j.scib.2019.09.012.

LI Y., LUO L., CHANG J., WANG Y., GUO A., FAN J. e LIU Q. 2020. **Hydrological drought evolution with a nonlinear joint index in regions with significant changes in underlying surface.** *Journal of Hydrology*, **585**: 124794, 1–16. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124794.

LIANG X. e LETTENMAIER D.P. 1994. **A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models.** *J. Geophys. Res.*, **99**, 415–428. doi: 10.1029/94JD00483.

LIERSCH S. (2003a). **The Programs dew.exe and dew02.exe: user's manual.** Berlin.

LIERSCH S. (2003b). **The Program pcpSTAT: user's manual.** Berlin.

LIU J. et al. 2017. **Water scarcity assessments in the past, present, and future.** *Earth's Future*, **5**, 545–559. doi:10.1002/2016EF000518.

LIU Y., JIANG H. 2019. **Sediment Yield Modeling Using SWAT Model: Case of Changjiang River Basin.** *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, **234**, 012031.

LÓPEZ-BALLESTEROS A., SENENT-APARICIO J., MARTÍNEZ C. e PÉREZ-SÁNCHEZ J. 2020. **Assessment of future hydrologic alteration due to climate change in the Arachthos River basin (NW Greece).** *Science of the Total Environment*, **733**: 139299, 1–13. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139299.

LYRA A., TAVARES P., CHOU S.C., SUEIRO G., DERECHYNSKI C.P., SONDERMANN M., SILVA A., MARENGO J. e GIAROLLA A. 2017. **Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution.** *Theor Appl Climatol.* doi:10.1007/s00704-017-2067.

MACHADO R.E. 2002. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** Tese (Doutorado). Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

MADADGAR S. e MORADKHANI H. 2013. **Drought analysis under climate change using copula.** *J. Hydrol. Eng.*, **18**(7), 746-759. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000532.

MapBiomass. **Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil.** Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 20 de set. de 2021.

MARENGO J.A., TORRES R.R. e ALVES L.M. 2017. **Drought in Northeast Brazil – past, present, and future.** *Theor Appl Climatol*, **129**(3–4), 1189–1200. doi: 10.1007/s00704-016-1840-8.

MARINHO FILHO G.M., ANDRADE R.S., ZUKOWSKI JÚNIOR J.C. e MAGALHÃES FILHO L.N.L. 2012. **Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades.** *Revista de Ciências Ambientais*, **6**(2), 35–47.

McKEE T.B., DOESKEN N.J. e KLEIST J. 1993. **The Relationship of Drought Frequency and Duration Times Scales.** Eight Conference on Applied Climatology. *American Meteorological Society*, 179–186.

NAGIREDDY N.R., KEESSARA V.R., SRIDHAR V. e SRINIVASAN R. 2022. **Streamflow and Sediment Yield Analysis of Two Medium-Sized East-Flowing River Basins of India.** *Water*, **14**, 2960. doi:10.3390/w14192960.

NASH J.E. e SUTCLIFFE J.V. 1970. **River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles.** *Journal of Hydrology*, **10** (1), 282–290.

NALBANTIS I. 2008. **Evaluation of a hydrological drought index.** *European Water*, **23**(24), 67–77.

NALBANTIS I. e TSAKIRIS G. 2009. **Assessment of hydrological drought revisited.** *Water Resour Manage*, **23**, 881–897. doi: 10.1007/s11269-008-9305-1.

NAUMANN G., ALFIERI L., WYSER K., MENTASCHI L., BETTS R. A., CARRAO H., SPINONI J., VOGT J. e FEYEN L. 2018. **Global changes in drought conditions under different levels of warming.** *Geophysical Research Letters*, **45**, 3285–3296. doi:10.1002/2017GL076521.

NAZARIO A.A., MORAES W.B., MADALÃO J.C., BRAGANÇA H.N., GONÇALVES I.Z. e GARCIA G.O. 2007. **Avaliação da condutividade elétrica de um argissolo irrigado com água salina em diferentes profundidades.** XI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, 2213–2216.

NEITSCH S.L., ARNOLD J.G., KINIRY J.R. e WILLIAMS J.R. 2011. **Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation Version 2009.** Texas Water Resources Institute, 1–647.

NRCS. Natural Resources Conservation Service. 2009. **Capítulo 7: Hydrologic Soil Groups.** In: NRCS. Natural Resources Conservation Service. *National Engineering Handbooks Hydrology Chapters (Part 630)*. Washington, DC: USDA, p. 1–5.

OLIVEIRA L.F.C., CORTÊS F.C., BARBOSA F.O.A., ROMÃO P.A. e CARVALHO D.F. 2000. **Estimativa das Equações de Chuvas Intensas para Algumas Localidades**

no Estado de Goiás Pelo Método da Desagregação de Chuvas. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, **20**, 23–27.

OLIVEIRA N.M.; SILVA R.M.; BRASIL NETO R.M.; SANTOS C.A.G. e VIANNA P. C.G. 2022. **Spatiotemporal patterns of agricultural and meteorological droughts using SPI and MODIS-based estimates over a Brazilian semiarid region: Study case of Upper Paraíba River basin.** *Geocarto International*, **37**, 1.

OMER A., ELAGIB N.A., ZHUGUO M., SALEEM F. e MOHAMMED A. 2020. **Water scarcity in the Yellow River Basin under future climate change and human activities.** *Science of the Total Environment*, **749**: 141446, 1–13. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141446.

ORKODJO T., KRANJAC-BERISAVIJEVIC G. e ABAGALE F. 2022. **Impact of climate change on future availability of water for irrigation and hydropower generation in the Omo-Gibe Basin of Ethiopia.** *Journal of Hydrology*, **44**: 101254, 1–29. doi: 10.1016/j.ejrh.2022.101254.

OZKAYA A. e ZERBERG Y. 2019. **A 40-year analysis of the hydrological drought index for the Tigris Basin, Turkey.** *Water*, **11**: 657, 1–15. doi: 10.3390/w11040657.

PAES J.L.A., RUIZ H.A., FERNANDES R.B.A., FREIRE M.B.G.S., BARROS M.F.C. e ROCHA G.C. 2013. **Dispersão de argilas em solos afetados por sais.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **17** (11), 1135–1142.

PALMER W.C. 1965. **Meteorological drought.** *Weather Bureau Research Paper* N° 45, US Department of Commerce, Washington, DC.

PANDA C., DAS D.M.; RAUL S.K. e SAHOO B.C. 2021. **Sediment yield prediction and prioritization of sub-watersheds in the Upper Subarnarekha basin (India) using SWAT.** *Arab. J. Geosci*, **14**, 809.

PANDA D.K., KUMAR A. e MOHANTY S. 2011. **Recent trends in sediment load of the tropical (Peninsular) river basins of India.** *Glob Planet Chang*, **75** (3-4), 108–118. doi: 10.1016/j.gloplacha.2010.10.012.

PANDHUMAS T., KUNTIYAWICHAI K., JOTHITYANGKOON C. e SURYADI F.X. 2020. **Assessment of climate change impacts on drought severity using SPI and SDI over the Lower Nam Phong River Basin, Thailand.** *Engineering and Applied Science Research*, **47**(3), 326–338. doi: 10.14456/easr.2020.35.

PARAJULI P.B. 2010. **Assessing sensitivity of hydrologic responses to climate change from forested watershed in Mississippi.** *Hydrol. Process.*, **24**, 3785–3797. doi: 10.1002/hyp.7793.

PAZ A.R. e FÉLIX V.S. 2016. **Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída.** *RBRH*, **21** (3). doi: 10.1590/2318-0331.011616009.

PONCE V.M. e HAWKINS R.H. 1996. **Runoff curve number: has it reached maturity?** *Journal of Hydrologic Engineering*, **1**, 11–19.

RADEVA K., NIKOLAVA N. e GERA M. 2018. **Assessment of hydro-meteorological drought in the Danube Plain, Bulgaria.** *Hrvatski geografski glasnik*, **80**, 7–25. doi: 10.21861/HGG.2018.80.01.01.

RAWLS W.J., BRAKENSIEK D.L., SAXTON K.E. 1982. **Estimation of Soil Water Properties.** *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, **25** (5), 1316–1328.

REDDY N.N., REDDY K.V., VANI J., DAGGUPATI P. e SRINIVASAN R. 2017. **Climate change impact analysis on watershed using QSWAT.** *Spat Inf Res*, **26** (3), 253–259.

RICCI G.F., ROMANO G., LERONNI V. e GENTILE F. 2019. **Effect of check dams on riparian vegetation cover: A multiscale approach based on field measurements and satellite images for Leaf Area Index assessment.** *Sci. Total Environ.*, **657**, 827–838. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.081.

ROCHA E.O. 2013. **Estudo ambiental integrado de processos hidrossedimentológicos e nutrientes na bacia hidrográfica do rio Piranga utilizando o SWAT.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

RODRIGUES J.A.M., VIOLA M.R., ALVARENGA L.A., MELLO C.R., CHOU S.C., OLIVEIRA V.A., UDDAMERI V. e MORAIS M.A.V. 2019. **Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome.** *International Journal of Climatology*, **40**, 2511–2526. doi: 10.1002/joc.6347.

SADHWANI K., ELDHO T.I., JHA M.K., KARMAKAR S. 2022. **Effects of dynamic land use/land cover change on flow and sediment yield in a monsoon-dominated tropical watershed.** *Water*, **14**, 3666. doi: 10.3390/w14223666.

SALTER P.J., WILLIAMS J.B. 1967. **The influence of texture on the moisture characteristics of soils.** IV: A method of estimating the available-water capacities of profiles in the field. *Journal of Soil Science*, **18** (1), 174–181.

SALTER P.J., WILLIAMS J.B. 1969. **The influence of texture on the moisture characteristics of soils.** V: Relationships between particle-size composition and moisture contents at the upper and lower limits of available-water. *Journal of Soil Science*, **20**, (1), 126–131.

SAM A.S., PADMAJA S.S., KACHELE H., KUMAR R. e MULLER K. 2020. **Climate change, drought and rural communities: Understanding people's perceptions and adaptations in rural eastern India.** International Journal of Disaster Risk Reduction, 44: 101436, 1–11. doi: 10.1016/j.ijdrr.2019.101436.

SANTOS C.A.G., BRASIL NETO R.M., NASCIMENTO T.V.M., SILVA R.M., MISHRA M. e FRADE T.G. 2021. **Geospatial drought severity analysis based on PERSIANN-CDR-estimated rainfall data for Odisha state in India (1983–2018).** *Science of the Total Environment*, 750: 141258, 1–14. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141258.

SANTOS, J. Y. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; Silva, R. M. ; SANTOS, C. A. G. ; Quinn, N. W. ; XAVIER, A. P. C. ; RIBEIRO NETO, A. 2021. **Modeling the impacts of future LULC and climate change on runoff and sediment yield in a strategic basin in the Caatinga/Atlantic forest ecotone of Brazil.** *Catena*, v. 203, p. 105308.

SARDOU F.S. e BAHREMAND A. 2014. **Hydrological drought analysis using SDI index in Halilrud Basin of Iran.** *Environmental Resources Research*, 2(1), 47–56. doi: 10.22069/IJERR.2014.1678.

SAXTON K.E., RAWLS W.J. 2006. **Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions.** *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1569–1578.

SHAFER B.A. e DEZMAN L.E. 1982. **Development of surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas.** Anais da 50^a Conferência Ocidental sobre Neve, 164–175, Reno, Nevada, 1982.

SHEFFIELD J. e WOOD E.F. 2011. **Drought: past problems and future scenarios.** Routledge, Londres. Doi: 10.4324/9781849775250.

SHUKLA S. e WOOD A.W. 2008. **Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought.** *Geophys. Res. Lett.*, 35 (2), 226–236. doi: 10.1029/2007GL032487.

SHUKLA S., JAIN S.K. e KANSAL M.L. 2021. **Hydrological modelling of a snow/glacier-fed western Himalayan basin to simulate the current and future streamflows under changing climate scenarios.** *Science of the Total Environment*, 795, 148871. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148871.

SILVA et al. 2021. **Análise da Susceptibilidade à Erosão Hídrica em uma Bacia Hidrográfica do Semiárido Brasileiro.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14 (3), 1443–1457.

SILVA T., LEITE J., CAVALCANTI A., DANTAS J., SOUSA F., NASCIMENTO M., MEDEIROS J., NETO O., CAMPOS G., SANTOS L. 2021. **Análise da Susceptibilidade**

à Erosão Hídrica em uma Bacia Hidrográfica do Semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, **14** (1481). doi: 10.26848/rbgf.v14.3.p1481-1495.

SHARANNYA T., MUDBHATKAL A., MAHESHA A. 2018. **Assessing climate change impacts on river hydrology—a case study in the Western Ghats of India.** *J Earth Syst Sci*, **127** (6), 1–11.

SUDENE. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. 1996. **Pacto Nordeste: ações estratégicas para um salto do desenvolvimento regional.** Recife, 1996. 77p.

SULLA-MENASHE D. e FRIEDL M.A. 2018. **User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) Product.** USGS, Figure 1, 1–18. doi: 10.5067/MODIS/MCD12Q1.

SUN C. e ZHOU X. 2020. **Characterizing hydrological drought and water scarcity changes in the future: a case study in the Jinghe River Basin of China.** *Water*, **12**: 1605, 1–17. doi: 10.3390/w12061605.

SWAIN M., PATTANAYAK S. e MOHANTY U.C. 2018. **Characteristics of occurrence of heavy rainfall events over Odisha during summer monsoon season.** *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **82**, 107–118. doi: 10.1016/j.dynatmoce.2018.05.004.

TABARI H., NIKBAKHT J. e TALAAEE P.H. 2013. **Hydrological Drought Assessment in Northwestern Iran Based on Streamflow Drought Index (SDI).** *Water Resour Manage*, **27**, 137–151. doi: 10.1007/s11269-012-0173-3.

TAMENE L. e VLEK P.L.G. 2008. **Soil Erosion Studies in Northern Ethiopia.** Land Use and Soil Resources; Braimoh, A.K., Vlek, P.L.G., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 73–100.

TANG X., ZHANG J., GAO C., RUBEN G.B. e WANG G. 2019. **Assessing the uncertainties of four precipitation products for SWAT modeling in Mekong River Basin.** *Remote Sens.*, **11**(304), 1–24. doi: 10.3390/rs11030304.

TAREKE K.A. e AWOKE A.G. 2023. **Hydrological drought forecasting and monitoring system development using artificial neural network (ANN) in Ethiopia.** *Heliyon*, **9** (e13287).

Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

TOUMA D., ASHFAQ M., NAYAK M.A., KAO S.-C. e DIFFENBAUGH N.S. 2015. **A multi-model and multi-index evaluation of drought characteristics in the 21st century.** *J. Hydrol.*, **526**, 196–207. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.12.011.

TSVETSINSKAYA E.A., SCHAAF C.B., GAO F., STRAHLER A.H., DICKINSON R.E., ZENG X. e LUCHT W. 2002. **Relating MODIS-derived surface albedo to soils**

and rock types over Northern Africa and the Arabian Peninsula. *Geophysical Research Letters*, **29** (9), 67-1-67-4.

UZEIKA T. 2009. **Aplicabilidade do modelo SWAT na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

VAN LOON A.F. e LAAHA G. 2015. **Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics.** *Journal of Hydrology*, **526**, 3–14. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.059.

VIANA J.F.S., MONTENEGRO S.M.G.L., DA SILVA B.B., DA SILVA R.M., SRINIVASAN R., SANTOS C.A.G., ARAUJO D.C.S. e TAVARES C.G. 2021. **Evaluation of gridded meteorological datasets and their potential hydrological application to a humid area with scarce data for Pirapama River basin, northeastern Brazil.** *Theoretical and Applied Climatology*, **145**, 393-410.

WANG G., YANG H., WANG L., XU Z. e XUE, B. 2014. **Using the SWAT model to assess impacts of land use changes on runoff generation in headwaters.** *Hydrol. Process.*, **28** (3), 1032–1042. doi: 10.1002/hyp.9645.

WIBLE T. 2014. **Enhanced watershed modeling and data analysis with a fully coupled hydrologic model and cloud-based flow analysis.** Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade do Estado de Colorado, Estados Unidos da América.

WILHITE D.A. e GLANTZ M.H. 1985. **Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions.** *Water Int.*, **10**, 111–120. doi: 10.1080/02508068508686328.

WILHITE D.A., SVOBODA M.D. e HAYES M.J. 2007. **Understanding the complex impacts of drought: a key to enhancing drought mitigation and preparedness.** *Water Resources Management*, **21** (5), 763–774. doi: 10.1007/s11269-006-9076-5.

WILLIAMS J.R. 1975a. **Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor.** Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources. ARS.S-40, US Gov. Print. Office, Washington, DC. 244-252.

WILLIAMS J.R. 1975b. **Sediment routing for agricultural watersheds.** *Water Resources Bulletin*, **11** (5), 965-974.

XAVIER P. C. D., XAVIER R. A., SEABRA V. S. e SILVA, R. M. 2020. **Análise morfométrica da bacia do Alto Rio Paraíba, região semiárida do Estado da Paraíba.** *Revista Brasileira de Geomorfologia*, **21**, p. 602-614.

YADAV A., CHATTERJEE S. e EQUEENUDDIN S.M. 2021. **Suspended sediment yield modeling in Mahanadi River, India by multi-objective optimization hybridizing**

artificial intelligence algorithms. *International Journal of Sediment Research*, **36**, 76-91. doi: 10.1016/j.ijsrc.2020.03.018.

YE X., XU C-Y. e ZHANG Z. 2020. **Comprehensive analysis on the evolution characteristics and causes of river runoff and sediment load in a mountainous basin of China's subtropical plateau.** *Journal of Hydrology*, **591**:125597, 1–12. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125597

ZHANG Y., DEGROOTE J., WOLTER C., SUGUMARAN R. 2009. **Integration of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk.** *Faculty Publications*, **37**.

ZHAO C., BRISSETTE F., CHEN J. e MARTEL J-L. 2020. **Frequency change of future extreme summer meteorological and hydrological droughts over North America.** *Journal of Hydrology*, **584**:124316, 1–11. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124316.

ZHAO P., LÜ H., YANG H., WANG W. e FU G. 2019. **Impacts of climate change on hydrological droughts at basin scale: A case study of the Weihe River Basin, China.** *Quaternary International*, **513**, 37–46. doi: 10.1016/j.quaint.2019.02.022.

ZHU Q., XUAN W., LIU L. e XU Y.P. **Evaluation and hydrological application of precipitation estimates derived from PERSIANN-CDR, TRMM 3B42V7, and NCEP-CFSR over humid regions in China.** *Hydrol. Process.*, **30**(17), 3061–3083. doi: 10.1002/hyp.10846.

ZENG P., SUN F., LIU Y., FENG H., ZHANG R. e CHE Y. 2021. **Changes of potential evapotranspiration and its sensitivity across China under future climate scenarios.** *Atmospheric Research*, **261**, 105763. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105763>.

APÊNDICE A – Banco de dados de solos

SNAM	CAM	ARG	NEO	LUV
NLAYERS	3	6	3	3
HYDGRP	B	B	B	B
SOL_ZMX	1900	1800	400	600
ANION_EXCL	0,398	0,398	0,453	0,464
SOL_CRK	0,5	0,5	0,5	0,5
TEXTURE	FRANCO-ARGILO-ARENOSA	FRANCO-ARENOSA COM CASCALHO	FRANCA CASCALHENTA	FRANCO-ARGILOSA
SOL_Z1	100	170	90	150
SOL_BD1	1,48	1,33	1,46	1,47
SOL_AWC1	1,5	1,82	1,35	1,66
SOL_K1	0,43	2,59	1,32	2,59
SOL_CBN1	11	10	11,8	7,3
CLAY1	24	12	17	14
SILT1	22	16	33	22
SAND1	54	72	50	64
ROCK1	1	14	18	46
SOL_ALB1	0,227	0,196	0,302	0,196
USLE_K1	0,12	0,117	0,132	0,127
SOL_EC1	0,23	3,03	5,65	0,25
SOL_Z2	1400	280	340	450
SOL_BD2	1,48	1,42	1,45	1,29
SOL_AWC2	1,5	1,92	1,35	1,93
SOL_K2	0,43	0,15	1,32	0,06
SOL_CBN2	3,8	6,5	4,5	5,5
CLAY2	32	26	22	59
SILT2	16	14	31	19
SAND2	52	60	47	22
ROCK2	1	9	32	0
SOL_ALB2	0,227	0,196	0,302	0,196
USLE_K2	0,108	0,108	0,128	0,099
SOL_EC2	0,23	3,03	5,65	0,25
SOL_Z3	1900	550	400	600
SOL_BD3	1,47	1,41	1,48	1,44
SOL_AWC3	1,5	1,92	1,35	2,51
SOL_K3	0,43	0,15	2,59	1,32
SOL_CBN3	2,3	4,3	2,3	2,5
CLAY3	29	30	13	25
SILT3	22	18	17	32
SAND3	49	52	70	43
ROCK3	2	8	35	3
SOL_ALB3	0,227	0,196	0,302	0,196
USLE_K3	0,117	0,111	0,121	0,126
SOL_EC3	0,23	3,03	5,65	0,25

SNAM	CAM	ARG	NEO	LUV
SOL_Z4	0	1000	0	0
SOL_BD4	0	1,43	0	0
SOL_AWC4	0	1,92	0	0
SOL_K4	0	0,15	0	0
SOL_CBN4	0	2,3	0	0
CLAY4	0	32	0	0
SILT4	0	17	0	0
SAND4	0	51	0	0
ROCK4	0	12	0	0
SOL_ALB4	0	0,196	0	0
USLE_K4	0	0,109	0	0
SOL_EC4	0	3,03	0	0
SOL_Z5	0	1400	0	0
SOL_BD5	0	1,48	0	0
SOL_AWC5	0	2,51	0	0
SOL_K5	0	0,32	0	0
SOL_CBN5	0	1,5	0	0
CLAY5	0	18	0	0
SILT5	0	30	0	0
SAND5	0	52	0	0
ROCK5	0	14	0	0
SOL_ALB5	0	0,196	0	0
USLE_K5	0	0,14	0	0
SOL_EC5	0	3,03	0	0
SOL_Z6	0	1800	0	0
SOL_BD6	0	1,55	0	0
SOL_AWC6	0	1,9	0	0
SOL_K6	0	0	0	0
SOL_CBN6	0	1	0	0
CLAY6	0	16	0	0
SILT6	0	18	0	0
SAND6	0	66	0	0
ROCK6	0	14	0	0
SOL_ALB6	0	0,196	0	0
USLE_K6	0	0,148	0	0
SOL_EC6	0	3,03	0	0

APÊNDICE B – Gerador climático utilizado (WGEN)

Gerador climático – Cenário Atual

Parâmetro	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
TMPMX	33,44	32,78	32,46	32,16	31,93	31,95	32,32	33,2	33,91	34,44	34,61	33,88
TMPMN	21,73	21,49	21,53	21,46	20,92	20,02	19,83	20,25	20,86	21,33	21,7	21,49
TMPSTDMX	1,209	1,661	1,469	1,433	1,761	1,489	1,711	0,722	1,114	0,568	0,769	0,874
TMPSTDMN	1,333	1,082	1,128	1,228	1,110	1,294	1,471	1,833	1,811	2,445	1,941	1,836
PCPMM	148,8	142,6	193,7	158,8	119,2	59,6	50,6	49,2	50,0	49,9	43,6	84,3
PCPSTD	12,08	11,59	12,91	10,87	11,06	4,63	2,59	1,96	1,67	3,18	2,78	5,60
PCPSKW	5,207	4,894	4,112	4,206	9,401	10,294	4,407	2,965	1,094	10,122	7,499	7,783
PR_W1	0,245	0,327	0,393	0,372	0,239	0,163	0,121	0,073	0,022	0,045	0,048	0,143
PR_W2	0,806	0,784	0,802	0,776	0,806	0,794	0,824	0,893	0,948	0,914	0,902	0,895
PCPD	18,45	18,21	21,97	19,9	18,45	14,55	14,52	15,45	15,86	14,07	12,62	19,45
RAINHHMX	45,00	40,60	38,80	40,73	64,20	30,17	9,03	8,00	6,20	17,87	12,67	24,80
SOLARAV	26,23	26,07	24,96	22,83	20,66	19,69	20,58	22,74	24,95	25,94	26,14	25,97
DEWPT	21,69	21,59	21,82	21,84	21,04	19,65	18,75	18,97	19,62	20,25	20,7	21,24
WNDAV	1,975	1,781	1,665	1,606	1,743	2,184	2,636	3,033	2,924	2,750	2,556	2,489

Gerador climático – Cenário Otimista

Parâmetro	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
TMPMX	31,44	30,57	30,25	30,04	29,53	29,37	29,67	30,61	32,36	33,29	33,25	32,37
TMPMN	20,39	20,69	20,64	19,92	18,26	17,08	16,75	16,66	17,03	17,70	18,89	19,92
TMPSTDMX	1,63	2,06	2,03	1,70	1,43	1,49	1,57	1,49	1,40	1,17	1,21	1,31
TMPSTDMN	1,33	1,17	1,09	1,32	1,42	1,36	1,47	1,32	1,37	1,35	1,50	1,50
PCPMM	104,48	145,93	143,56	86,19	20,36	4,32	3,37	1,55	1,43	1,81	12,15	46,12
PCPSTD	6,23	7,09	6,40	5,15	2,11	0,72	0,63	0,37	0,49	0,50	2,21	4,24
PCPSKW	2,65	1,73	1,78	2,58	5,75	9,09	9,14	12,26	17,11	12,48	9,82	4,43
PR_W1	0,32	0,41	0,41	0,40	0,31	0,23	0,17	0,15	0,08	0,07	0,11	0,17
PR_W2	0,72	0,83	0,82	0,72	0,56	0,52	0,53	0,49	0,40	0,31	0,37	0,67
PCPD	16,50	19,93	21,40	17,64	12,96	9,83	8,34	7,17	3,59	2,73	4,44	10,34
RAINHHMX	7,68	7,72	7,47	5,87	2,58	0,72	0,63	0,37	0,37	0,38	2,25	4,26
SOLARAV	31,48	30,75	30,22	29,27	28,24	27,63	28,62	31,27	33,89	34,66	33,77	32,43
DEWPT	15,32	16,05	17,52	18,45	17,87	17,15	16,79	16,65	16,85	16,62	15,79	15,24
WNDAV	2,79	2,44	2,29	2,50	3,44	3,96	3,86	4,11	4,01	3,80	3,38	3,10

Gerador climático – Cenário Pessimista

Parâmetro	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
TMPMX	31,44	30,57	30,25	30,04	29,53	29,37	29,67	30,61	32,36	33,29	33,25	32,37
TMPMN	20,39	20,69	20,64	19,92	18,26	17,08	16,75	16,66	17,03	17,70	18,89	19,92
TMPSTDMX	1,63	2,06	2,03	1,70	1,43	1,49	1,57	1,49	1,40	1,17	1,21	1,31
TMPSTDMN	1,33	1,17	1,09	1,32	1,42	1,36	1,47	1,32	1,37	1,35	1,50	1,50
PCPMM	104,48	145,93	143,56	86,19	20,36	4,32	3,37	1,55	1,43	1,81	12,15	46,12
PCPSTD	6,23	7,09	6,40	5,15	2,11	0,72	0,63	0,37	0,49	0,50	2,21	4,24
PCPSKW	2,65	1,73	1,78	2,58	5,75	9,09	9,14	12,26	17,11	12,48	9,82	4,43
PR_W1	0,32	0,41	0,41	0,40	0,31	0,23	0,17	0,15	0,08	0,07	0,11	0,17
PR_W2	0,72	0,83	0,82	0,72	0,56	0,52	0,53	0,49	0,40	0,31	0,37	0,67
PCPD	16,50	19,93	21,40	17,64	12,96	9,83	8,34	7,17	3,59	2,73	4,44	10,34
RAINHHMX	7,68	7,72	7,47	5,87	2,58	0,72	0,63	0,37	0,37	0,38	2,25	4,26
SOLARAV	31,48	30,75	30,22	29,27	28,24	27,63	28,62	31,27	33,89	34,66	33,77	32,43
DEWPT	15,32	16,05	17,52	18,45	17,87	17,15	16,79	16,65	16,85	16,62	15,79	15,24
WNDAV	2,79	2,44	2,29	2,50	3,44	3,96	3,86	4,11	4,01	3,80	3,38	3,10