



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ÁREA: RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL

JOSÉ MATHEUS DA SILVA MIRANDA

**DINÂMICA DO USO E COBERTURA DA TERRA E SUA INFLUÊNCIA SOBRE A
DISPONIBILIDADE HÍDRICA: O CASO DO SISTEMA HÍDRICO POÇÕES-
EPITÁCIO PESSOA**

CAMPINA GRANDE – PB

2026

**DINÂMICA DO USO E COBERTURA DA TERRA E SUA INFLUÊNCIA SOBRE A
DISPONIBILIDADE HÍDRICA: O CASO DO SISTEMA HÍDRICO POÇÕES-EPITÁCIO
PESSOA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de
Campina Grande para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil e Ambiental.

Orientadores:

Profa. Dra. Iana Alexandra Alves Rufino

Prof. Dr. Ricardo de Aragão

CAMPINA GRANDE - PB

2026

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Sistema de Bibliotecas - SISTEMOTECA
Catalogação de Publicação na Fonte. UFCG - Biblioteca Central

M672d

Miranda, José Matheus da Silva.

Dinâmica do uso e cobertura da terra e sua influência sobre a disponibilidade hídrica: o caso do sistema hídrico Poções-Epitácio Pessoa / José Matheus da Silva Miranda. – 2026.

132 f. : il. color

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2026.

“Orientação: Profa. Dra. Iana Alexandra Alves Rufino, Prof. Dr. Ricardo de Aragão”.

Referências.

1. Recursos Hídricos. 2. Modelagem Hidrológica. 3. Disponibilidade Hídrica. 4. Semiárido Brasileiro. 5. Uso e Cobertura da Terra. 6. SWAT. 7. Saneamento Ambiental. I. Rufino, Iana Alexandra Alves. II. Aragão, Ricardo. III. Título.

UFCG/BC

CDU 556.18(043.3)

**DINÂMICA DO USO E COBERTURA DA TERRA E SUA INFLUÊNCIA SOBRE A
DISPONIBILIDADE HÍDRICA: O CASO DO SISTEMA HÍDRICO POÇÕES-
EPITÁCIO PESSOA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de
Campina Grande para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil e Ambiental.

Submetida em 04 de fevereiro de 2026 pela banca examinadora:

Profa. Dra. Iana Alexandra Alves Rufino
Universidade Federal de Campina Grande
Orientadora

Prof. Dr. Ricardo de Aragão
Universidade Federal de Campina Grande
Coorientador

Prof. Dr. Rodolfo Luiz Bezerra Nóbrega
Universidade Federal de Campina Grande
Examinador interno

Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz
Universidade Federal da Paraíba
Examinador externo



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

ALUNO(A): JOSÉ MATHEUS DA SILVA MIRANDA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.^a IANA A. A. RUFINO - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR. RICARDO DE ARAGÃO - PPGECA/UFCG - COORIENTADOR, DR. RODOLFO L. B. NÓBREGA - EXAMINADOR INTERNO, DR. ADRIANO ROLIM DA PAZ - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 03/2026)/ TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: "DINAMICA DO USO E COBERTURA DA TERRA E SUA INFLUENCIA SOBRE A DISPONIBILIDADE HÍDRICA: O CASO DO SISTEMA HÍDRICO POÇOS-EPITÁCIO PESSOA" / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL / HORA DE INICIO: 08:30 HORAS / NO LABORATÓRIO DE COMPUTADORES DO LABHID2, BLOCO BU, CAMPUS SEDE DA UFCG, DE FORMA HÍBRIDA.

3. **EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA", SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE "APROVADO". NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, ISABELLY CRISTINNY GOMES GAUDENCIO, SECRETÁRIA, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 04 DE FEVEREIRO DE 2026**

5.

6.  Documento assinado digitalmente
ADRIANO ROLIM DA PAZ
Data: 10/02/2026 18:02:58-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

8.

9. **ADRIANO ROLIM DA PAZ - EXAMINADOR EXTERNO**



Documento assinado eletronicamente por **ISABELLY CRISTINNY GOMES GAUDENCIO, ASSISTENTE EM ADMINISTRACAO**, em 05/02/2026, às 16:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **IANA ALEXANDRA ALVES RUFINO, COORDENADOR(A)**, em 05/02/2026, às 17:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Matheus da Silva Miranda, Usuário Externo**, em 05/02/2026, às 17:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodolfo Luiz Bezerra Nobrega, Usuário Externo**, em 09/02/2026, às 10:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **RICARDO DE ARAGAO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/02/2026, às 13:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **6232199** e o código CRC **D114C9CB**.

Referência: Processo nº 23096.002155/2026-10

SEI nº 6232199

DEDICATÓRIA

A minha família, em especial meus pais, por sempre acreditarem em mim e por nunca me deixarem desistir de sonhar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha vida, saúde e por me mostrar que, Nele, tudo posso, mesmo diante das dificuldades. Pela sabedoria concedida e pelo conhecimento adquirido ao longo desses anos, que espero usar com discernimento e gratidão.

À minha mãe, Ailma da Silva Brito, exemplo de perseverança, bondade e amor incondicional, que sempre acreditou em mim e jamais mediu esforços para me proporcionar a melhor formação e oportunidades na vida. Ao meu pai, José Garibaldi, exemplo de humildade e determinação, que sempre me incentivou a ser uma pessoa melhor e me ensinou o valor do esforço e da garra.

À minha orientadora, Professora Iana, por sua inspiração, dedicação e excelência profissional. Agradeço por todo apoio, orientação e incentivo, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Ao meu coorientador, Ricardo, por sua paciência, disponibilidade e generosidade em compartilhar conhecimento, oferecendo suporte técnico e contribuindo significativamente para a realização desta dissertação.

À minha tia, Ana Elvira, por sempre torcer pelo meu sucesso e comemorar minhas conquistas com entusiasmo e carinho.

Aos meus amigos do PPGECA, pelo apoio constante dentro e fora do ambiente acadêmico, tornando a jornada mais leve e significativa.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Campina Grande, em especial do Bloco de Hidráulica, pelo acolhimento, ensinamentos e oportunidades que me foram proporcionados ao longo dos anos.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, deixo meu sincero agradecimento.

RESUMO

As regiões semiáridas caracterizam-se por elevada variabilidade climática, com regimes pluviométricos irregulares e intensas taxas de evapotranspiração, tornando a disponibilidade hídrica um dos principais desafios para o planejamento ambiental e a gestão dos recursos hídricos. Nesse contexto, este estudo investigou a influência das alterações no uso e na cobertura da terra sobre a disponibilidade hídrica em bacias do semiárido paraibano, por meio da integração entre sensoriamento remoto e modelagem hidrológica com o modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT). O modelo foi aplicado às bacias do Alto rio Paraíba, do rio Taperoá e à sub-bacia associada ao reservatório Santo Antônio, sendo calibrado e validado com base em séries históricas de vazão e nos indicadores estatísticos R^2 , NSE, RSR e PBIAS, compatíveis com os critérios recomendados na literatura. As simulações evidenciaram comportamentos hidrológicos contrastantes entre as bacias analisadas. Na bacia do Alto rio Paraíba observou-se aumento das vazões médias durante a estação chuvosa, com acréscimo acumulado de aproximadamente 9,9% no período de março a maio entre 1994 e 2020. Em contrapartida, na bacia do rio Taperoá verificou-se redução sistemática das vazões médias, com decréscimo da ordem de 15% no período chuvoso entre 1994 e 2047, acompanhada da diminuição da lâmina escoada anual de 37,36 mm para 30,59 mm e da produção de sedimentos de 2,06 t ha⁻¹ para 1,70 t ha⁻¹. A análise em microescala, na sub-bacia do reservatório Santo Antônio, indicou variações pouco expressivas nas vazões médias, reforçando a predominância do controle climático. De forma integrada, os resultados indicam que, embora as mudanças no uso e na cobertura da terra exerçam influência moderada sobre a vazão média anual, seus efeitos tornam-se mais evidentes na redistribuição temporal das vazões, na geração de lâmina escoada e na produção de sedimentos. Conclui-se que a gestão sustentável dos recursos hídricos em bacias semiáridas deve priorizar o planejamento em escala de bacia, a conservação da cobertura vegetal estratégica e o uso integrado de sensoriamento remoto e modelagem hidrológica como ferramentas de suporte à tomada de decisão.

Palavras-chave: Semiárido brasileiro; Uso e cobertura da terra; Modelagem hidrológica; Disponibilidade hídrica; SWAT.

ABSTRACT

Semi-arid regions are characterized by high climatic variability, irregular rainfall regimes, and intense evapotranspiration rates, making water availability one of the main challenges for environmental planning and water resources management. In this context, this study investigated the influence of land use and land cover changes on water availability in watersheds located in the semi-arid region of Paraíba State, Brazil, through the integration of remote sensing and hydrological modeling using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). The model was applied to the Upper Paraíba River basin, the Taperoá River basin, and the sub-basin associated with the Santo Antônio reservoir, and was calibrated and validated using historical streamflow records and statistical performance indicators (R^2 , NSE, RSR, and PBIAS), which were consistent with the criteria recommended in the literature. The simulations revealed contrasting hydrological responses among the analyzed basins. In the Upper Paraíba River basin, an increase in mean streamflows was observed during the rainy season, with an accumulated rise of approximately 9.9% from March to May between 1994 and 2020. In contrast, the Taperoá River basin exhibited a systematic reduction in mean streamflows, with a decrease of about 15% during the rainy season between 1994 and 2047, accompanied by a decline in annual runoff depth from 37.36 mm to 30.59 mm and in sediment yield from 2.06 t ha⁻¹ to 1.70 t ha⁻¹. Micro-scale analysis in the sub-basin of the Santo Antônio reservoir indicated only minor variations in mean streamflows among scenarios, reinforcing the predominance of climatic control over hydrological responses. Overall, the results indicate that although land use and land cover changes exert a moderate influence on annual mean streamflow, their effects become more pronounced in the temporal redistribution of flows, runoff generation, and sediment production. It is concluded that sustainable water resources management in semi-arid basins should prioritize basin-scale planning, the conservation of strategic vegetation cover, and the integrated use of remote sensing and hydrological modeling as decision-support tools.

Keywords: Brazilian semi-arid region; Land use and land cover; Hydrological modeling; Water availability; SWAT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visão geral e produção anual de documentos.....	29
Figura 2 - Distribuição temporal das produções científicas	30
Figura 3 - Distribuição espacial dos documentos relacionados.....	31
Figura 4 - Mapa temático de palavras-chave.....	31
Figura 5 - Rede de clusters de coocorrência de palavras-chave	34
Figura 6 – Síntese do passo a passo metodológico.....	50
Figura 7 - Localização geográfica da área de estudo.....	51
Figura 8 - Bacia do SHPoEP com as sub-bacias trabalhadas no estudo e localização dos postos fluviométricos.....	54
Figura 9 - Declividade da bacia do SHPoEP	56
Figura 10 - Área de contribuição hidrológica da sub-bacia do Alto rio Paraíba	57
Figura 11 - Área de contribuição hidrológica da sub-bacia do rio Taperoá	57
Figura 12 – Mapa do modelo digital de elevação da bacia do SHPoEP	59
Figura 13 - Mapas de uso e cobertura da terra para a bacia do SHPoEP	61
Figura 14 - Mapas de uso e cobertura da terra para a bacia do SHPoEP	63
Figura 15 - Mapa de solo da bacia do SHPoEP.....	64
Figura 16 - Porcentagem de cada tipo de solo da bacia do SHPoEP.....	65
Figura 17 - Postos pluviométricos da bacia do SHPoEP.....	66
Figura 18 - Diferença entre as classes de uso e ocupação do solo	74
Figura 19 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 1994	79
Figura 20 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 1994.....	82
Figura 21 - Área de contribuição hidrológica do reservatório Santo Antônio	83
Figura 22 - Hidrograma da sub-bacia do reservatório Santo Antônio para o ano de 1994	85
Figura 23 - Hidrograma da sub-bacia do reservatório Santo Antônio para o ano de 2020	85
Figura 24 - Vazões médias para a área de drenagem de Santo Antônio	86
Figura 25 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 1994	87

Figura 26 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 1994.....	88
Figura 27 -Lâmina escoada anual para sub-bacia do Alto rio Paraíba, estação Caraúbas nos cenários analisados.....	92
Figura 28 - Produção de sedimentos para sub-bacia do Alto rio Paraíba, estação Caraúbas nos cenários analisados.....	93
Figura 29 - Vazões médias mensais na bacia do Alto rio Paraíba - Estação Caraúbas ..	93
Figura 30 – Lâmina escoada anual para sub-bacia do rio Taperoá, estação Poço de Pedras nos cenários analisados	95
Figura 31 - Produção de sedimentos para sub-bacia do rio Taperoá, estação Poço de Pedras nos cenários analisados	96
Figura 32 - Vazões médias mensais na bacia do rio Taperoá - Estação Poço de Pedras	97
Figura 33 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2020	125
Figura 34 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2020	125
Figura 35 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2027	126
Figura 36 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2027	126
Figura 37 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2032	127
Figura 38 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2032	127
Figura 39 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2037	128
Figura 40 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2037	128
Figura 41 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2042	129
Figura 42 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2042	129
Figura 43 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2047	130

Figura 44 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2047	130
Figura 45 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2020.....	131
Figura 46 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2020.....	131
Figura 47 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2027.....	131
Figura 48 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2027.....	132
Figura 49 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2032.....	132
Figura 50 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2032.....	133
Figura 51 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2037.....	133
Figura 52 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2037.....	134
Figura 53 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2042.....	134
Figura 54 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2042.....	134
Figura 55 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2047.....	135
Figura 56 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2047.....	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Operadores utilizados para o levantamento nas bases de dados da Scopus e Web of Science.....	27
Tabela 2 - Lista de artigos com o ranking InOrdinatio e aspectos teóricos.....	34
Tabela 3 - Funções objetivo e suas classificações quanto ao desempenho do modelo ..	49
Tabela 4 - Reservatórios inseridos no modelo.....	58
Tabela 5 - Classificação das categorias de uso e cobertura do solo conforme o MapBiomass.....	61
Tabela 6 - Classes de solo presentes na bacia do SHPoEP e o respectivo SWAT code	63
Tabela 7 – Identificação das estações fluviométricas na área de estudo	67
Tabela 8 - Revisão dos parâmetros e respectivas descrições.....	68
Tabela 9 - Categorias de uso e cobertura do solo na bacia do SHPoEP e suas respectivas áreas de abrangência ao longo do tempo	73
Tabela 10 - Porcentagem de cada cenário de uso e cobertura da terra na bacia do SHPoEP	73
Tabela 11 - Valores calibrados para a estação Caraúbas.....	77
Tabela 12 - Valores calibrados para a estação Caraúbas para cenários passados e futuros	78
Tabela 13 - Resultado da calibração para a estação Caraúbas	79
Tabela 14 - Valores calibrados para a estação Poço de Pedras	80
Tabela 15 - Valores calibrados para a estação Poço de Pedras para cenários passados e futuros.....	80
Tabela 16 - Resultado da calibração para a estação Poço de Pedras.....	81
Tabela 17 - Validação para a estação Caraúbas	86
Tabela 18 - Validação para a estação Poço de Pedras.....	88
Tabela 19 - Continuação da lista de artigos com o ranking InOrdinatio e aspectos teóricos	115

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	28
Equação 2	44
Equação 3	45
Equação 4	45
Equação 5	47
Equação 6	48
Equação 7	48
Equação 8	49

LISTA COM PRINCIPAIS ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CAR	Cadastro Ambiental Rural
CAV	Cota-Área-Volume
CN	<i>Curve Number</i>
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
GLUE	<i>Generalized Likelihood Uncertainty Estimation</i>
HRU	<i>Hydrologic Response Units</i>
HTESSEL	<i>Hydrology Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
InVEST	<i>Integrated Evaluation Of Services And Tradeoffs</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
JULES	<i>Joint UK Land Environment Simulator</i>
LCM	<i>Land Change Modeller</i>
LULC	<i>Land Use and Land Cover</i>
LULCC	<i>Land Use and Land Cover Change</i>
MAPBIOMAS	Projeto de Mapeamento Anual de Uso e Cobertura da Terra no Brasil
MCMC	Monte Carlo de Cadeias de Markov
MDE	Modelo Digital de Elevação
MIKE-SHE	<i>Système Hydrologique Européen</i>
MLP-ANN	<i>Multilayer Perceptron Artificial Neural Network</i>
MOLUSCE	<i>Modules For Land-Use Change Evaluation</i>
NSE	<i>Nash-Sutcliffe Efficiency</i>
ORCHIDEE	<i>Organizing Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems</i>
PBIAS	<i>Percent Bias</i>
PCR-GLOBWB	<i>Programma Coördinatie Research – GLOBal Water Balance</i>
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco
R ²	<i>Coefficient of Determination</i>
RSB	Região Semiárida Brasileira

RSR	<i>Observation Standard Deviation Ratio</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SHPoEP	Sistema Hídrico Poções-Epitácio Pessoa
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SIGMA	Segurança Hídrica de Municípios Paraibanos
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SUFI-2	<i>Sequential Uncertainty Fitting, Version 2</i>
SURFEX	<i>SURFace EXternalisée</i>
SWAT	<i>Soil & Water Assessment Tool</i>
SWAT-CUP	<i>Soil & Water Assessment Tool Calibration and Uncertainty Procedures</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
VAR	<i>Vector Autoregression</i>
VIC	<i>Variable Infiltration Capacity</i>
WETSPA	<i>Water and Energy Transfer between Soil, Plants, and Atmosphere</i>
WGS	<i>World Geodetic System</i>
WOS	<i>Web Of Science</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	20
1.1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	21
1.2. HIPÓTESE DO ESTUDO	24
1.3. OBJETIVOS.....	24
1.2.1. <i>Objetivo geral.....</i>	<i>24</i>
1.2.2. <i>Objetivos específicos.....</i>	<i>24</i>
CAPÍTULO 2	25
2.1. METODOLOGIA DA REVISÃO	26
2.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
2.2.1. <i>Análise bibliométrica.....</i>	<i>29</i>
2.2.2. <i>Principais conclusões dos artigos avaliados.....</i>	<i>37</i>
2.2.3. <i>Principais modelos e metodologias utilizados nos trabalhos avaliados</i>	<i>38</i>
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
CAPÍTULO 3	43
3.1. DESCRIÇÃO DO MODELO SWAT	44
3.1.1. <i>QSWAT: uma interface de código aberto para SWAT</i>	<i>45</i>
3.1.2. <i>Calibração e validação do modelo SWAT (SWAT-CUP).....</i>	<i>46</i>
3.1.3. <i>Avaliação de desempenho do modelo SWAT.....</i>	<i>47</i>
3.2. METODOLOGIA.....	49
3.3. ÁREA DE ESTUDO.....	50
3.3.1. <i>Caracterização do território: a escala da bacia hidrográfica</i>	<i>53</i>
3.4. CONFIGURAÇÃO E DADOS DE ENTRADA DO MODELO.....	54
3.4.1. <i>Modelo digital de elevação (MDE).....</i>	<i>58</i>
3.4.2. <i>Uso e cobertura da terra.....</i>	<i>59</i>
3.4.3. <i>Solo.....</i>	<i>63</i>
3.4.4. <i>Dados climáticos.....</i>	<i>65</i>
3.4.5. <i>Dados hidrológicos.....</i>	<i>67</i>
3.5. SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO	67
CAPÍTULO 4.....	72
4.1. EVOLUÇÃO E PROJEÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA	73
CAPÍTULO 5.....	76
5.1. CALIBRAÇÃO	77
5.1.1. <i>Estação Caraúbas.....</i>	<i>77</i>
5.1.2. <i>Estação Poço de Pedras.....</i>	<i>80</i>
5.1.3. <i>Sub-bacia do reservatório Santo Antônio.....</i>	<i>82</i>
5.2. VALIDAÇÃO	86
5.2.1. <i>Estação Caraúbas.....</i>	<i>86</i>
5.2.2. <i>Estação Poço de Pedras.....</i>	<i>87</i>
CAPÍTULO 6	89

6.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DESEMPENHO DO MODELO	90
6.2.1. Estação Caraúbas.....	90
6.2.2. Considerações sobre a produção hídrica, a geração de sedimentos e o regime de vazões médias na bacia do Alto rio Paraíba.....	91
6.2.3. Estação Poço de Pedras.....	94
CAPÍTULO 7	98
7.1. CONCLUSÃO.....	99
REFERÊNCIAS	101
ANEXO I.....	114

CAPÍTULO 1

Neste capítulo, são apresentados os elementos introdutórios da dissertação, incluindo a contextualização do tema e a relevância do estudo, a partir da qual se justifica a condução desta pesquisa. Serão discutidos os principais desafios relacionados à disponibilidade hídrica em regiões semiáridas, assim como a influência das mudanças no uso e na cobertura do solo sobre os processos hidrológicos. Além disso, o capítulo delineará o objetivo geral da pesquisa, que orienta todo o desenvolvimento do trabalho, bem como os objetivos específicos, que detalham as etapas necessárias para atingir os resultados propostos e fundamentam a metodologia adotada.

1.1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

As regiões semiáridas do planeta são marcadas por regimes pluviométricos irregulares, elevadas taxas de evapotranspiração e recorrentes déficits hídricos, configurando ambientes naturalmente vulneráveis à escassez de água. Essas áreas, concentradas na faixa tropical do planeta e majoritariamente em países em desenvolvimento, enfrentam desafios crescentes relacionados à disponibilidade hídrica, à segurança alimentar e ao desenvolvimento socioeconômico. Tal vulnerabilidade é intensificada tanto pelas mudanças climáticas quanto pelas transformações no uso e na cobertura da terra (*Land Use and Land Cover* – LULC), que afetam diretamente os processos hidrológicos e hidrossedimentológicos, comprometendo a segurança hídrica regional (Buytaert et al., 2012; Scholes, 2020). Estudos recentes demonstram que, nas últimas décadas, a atuação conjunta de fatores climáticos e antrópicos têm acelerado a degradação ambiental em regiões semiáridas, resultando na redução da disponibilidade de recursos hídricos e no aumento da vulnerabilidade das populações locais (Mirdashtvan et al., 2021; Singh; Chudasama, 2020).

Nesse contexto, a relação entre as mudanças no uso e na cobertura da terra e os recursos hídricos tem sido amplamente discutida na literatura científica (Al-Ghobari et al., 2020; Khansa Gulshad et al., 2024). Processos como a expansão da agricultura intensiva, a urbanização não planejada e o desmatamento acelerado têm provocado alterações significativas nos regimes hidrológicos, influenciando diretamente a infiltração da água no solo, o escoamento superficial e a recarga dos aquíferos (Dibaba et al., 2020; Regasa e Nones, 2022). Esses impactos tornam-se ainda mais críticos em ambientes semiáridos, nos quais a vegetação exerce papel fundamental na regulação do ciclo hidrológico. No Brasil, estudos como o de Silva et al. (2021) indicam que a substituição da vegetação nativa por monoculturas agrícolas e áreas de pastagem tem reduzido a capacidade de infiltração dos solos e aumentado a suscetibilidade à desertificação.

Além das mudanças no uso da terra, as alterações climáticas globais configuram um fator adicional de pressão sobre os sistemas hidrológicos, em regiões semiáridas. O aumento das temperaturas médias e as modificações nos padrões de precipitação têm intensificado a frequência e a severidade de eventos extremos, como secas prolongadas e episódios de chuvas intensas concentradas em curtos períodos (IPCC, 2023; Mohammed; Scholz, 2017). Esses fenômenos afetam diretamente a capacidade dos solos em armazenar água, alteram a dinâmica dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos e colocam em

risco a sustentabilidade ambiental e socioeconômica dessas regiões (El-Rawy et al., 2023).

Diante desse cenário complexo, avanços tecnológicos recentes, como o sensoriamento remoto de alta resolução e técnicas de *machine learning*, têm possibilitado um monitoramento mais detalhado das mudanças no uso e na cobertura da terra, além de promover uma compreensão mais aprofundada de seus impactos sobre a disponibilidade e a dinâmica dos recursos hídricos. O uso do sensoriamento remoto associado a modelos hidrológicos distribuídos e de base física, como o *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT), *Variable Infiltration Capacity* (VIC) e *Système Hydrologique Européen* (MIKE-SHE), tem se consolidado como uma abordagem robusta para avaliar e prever os efeitos das mudanças no LULC sobre a disponibilidade hídrica (Aieko et al., 2024; Bouchagoura et al., 2024). Estudos demonstram que a integração de dados de sensoriamento remoto com Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é fundamental para mapear transformações na paisagem e analisar suas implicações na dinâmica hidrológica em diferentes escalas espaciais e temporais (Al-Ghobari et al., 2020; Khansa Gulshad et al., 2024).

A integração entre modelos hidrológicos e dados espaciais tem se mostrado especialmente promissora na simulação de cenários futuros e no suporte à tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos. Trabalhos como o de Govender; Dube; Shoko (2022) indicam que essa abordagem aumenta a precisão das previsões hidrológicas e contribui para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes de adaptação às mudanças climáticas. Além disso, tais ferramentas têm sido utilizadas para avaliar a eficácia de práticas conservacionistas, como o reflorestamento e a adoção de sistemas agroflorestais, na mitigação dos impactos hidrológicos decorrentes das mudanças climáticas e do uso da terra (Yi et al., 2023).

Apesar da ampla disponibilidade de métodos, dados e ferramentas, ainda existem lacunas importantes na compreensão e quantificação dos efeitos das mudanças no LULC sobre a disponibilidade hídrica. Torna-se, portanto, fundamental o aprofundamento de estudos que avaliem essas interações em diferentes escalas espaciais e temporais, fornecendo subsídios técnicos e científicos para o aprimoramento das políticas públicas e das estratégias de gestão dos recursos hídricos. No Brasil, a seca configura-se como um dos desastres naturais mais recorrentes e impactantes para a população, afetando milhões de pessoas na Região Semiárida Brasileira (RSB) e representando um fenômeno complexo e persistente ao longo dos últimos séculos (Dos Santos et al., 2020).

A Região Semiárida Brasileira (RSB) caracteriza-se por uma distribuição irregular das chuvas espacialmente e ao longo do ano, altas temperaturas do ar e evapotranspiração potencial anual superior à precipitação anual, resultando em um balanço hídrico predominantemente negativo (Ferraz et al., 2023). Além disso, os eventos pluviométricos, quando ocorrem, tendem a ser intensos, provocando respostas rápidas do escoamento superficial, aumento da erosão do solo e maior transporte de sedimentos para os cursos d'água (Koch et al., 2020). Essas características reforçam a necessidade de estudos que avaliem de forma integrada os processos hidrológicos e as transformações na paisagem.

Nesse contexto, a modelagem hidrológica constitui uma ferramenta fundamental para a compreensão do funcionamento dos sistemas hídricos e dos impactos das mudanças climáticas, do crescimento populacional e das alterações no uso e cobertura da terra em bacias hidrográficas (Bai et al., 2021). Entre os modelos disponíveis, o SWAT destaca-se pela ampla aplicação em estudos científicos e no apoio à gestão de recursos hídricos, especialmente por sua capacidade de simular processos hidrológicos em longo prazo. No contexto brasileiro, Silva et al. (2021) utilizaram a modelagem hidrológica para avaliar a disponibilidade hídrica na Bacia do Rio São Francisco, considerando diferentes cenários climáticos e de demanda, evidenciando riscos de colapso no abastecimento mesmo com a transposição de águas. Assim, a aplicação do SWAT em regiões semiáridas brasileiras mostra-se particularmente relevante, pois permite analisar de forma integrada os efeitos das mudanças no clima e no uso da terra sobre a disponibilidade hídrica, subsidiando o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos.

A realização do presente estudo justifica-se pela necessidade crescente de compreender, de forma integrada e quantitativa, os impactos das mudanças no uso e na cobertura da terra sobre a disponibilidade hídrica em regiões semiáridas, especialmente no contexto do semiárido brasileiro, onde a escassez de água constitui um fator limitante ao desenvolvimento socioeconômico e à segurança hídrica. Embora avanços significativos tenham sido alcançados no monitoramento ambiental por meio do sensoriamento remoto e da modelagem hidrológica, ainda persistem lacunas quanto à avaliação dos efeitos dessas mudanças em diferentes escalas espaciais e temporais e sujeitas à variabilidade climática extrema. Nesse sentido, a aplicação integrada de dados espaciais e da modelagem permite investigar de maneira robusta os processos hidrológicos dominantes, bem como simular cenários passados, atuais e futuros de uso da terra, fornecendo subsídios técnico-científicos essenciais para o planejamento, a gestão

sustentável dos recursos hídricos e a formulação de políticas públicas voltadas à mitigação dos impactos da escassez hídrica em ambientes semiáridos.

1.2. HIPÓTESE DO ESTUDO

Parte-se da hipótese de que as mudanças no uso e na cobertura da terra ocorridas em bacias hidrográficas ao longo do tempo alteram significativamente os processos hidrológicos dominantes, especialmente o escoamento superficial, a infiltração, a recarga subterrânea e a retenção hídrica, refletindo-se em modificações na disponibilidade hídrica.

De forma complementar, assume-se que a expansão de classes antrópicas e a redução de áreas com maior capacidade de proteção do solo e de regulação hidrológica intensificam os processos erosivos e o escoamento superficial, enquanto a presença de reservatórios exerce efeito regulador sobre as vazões, reduzindo valores médios e atenuando picos de escoamento quando comparados a cenários sem essas estruturas.

1.3. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Analisar a influência da dinâmica de uso e ocupação do solo do sistema hídrico Poções-Epitácio Pessoa sobre os processos hidrossedimentológicos, e suas consequências diretas na disponibilidade hídrica.

1.2.2. Objetivos específicos

- Investigar metodologias de análise da relação existente entre mudanças de uso e ocupação do solo e regime de vazões;
- Aplicar uma metodologia observada na literatura na bacia do sistema hídrico Poções-Epitácio Pessoa analisando os seus resultados;

CAPÍTULO 2

Neste capítulo, será realizada uma revisão bibliográfica sobre a influência do uso e ocupação do solo na disponibilidade hídrica em regiões semiáridas, com o objetivo de contextualizar o tema e identificar lacunas e avanços na literatura científica. Serão abordados estudos que investigam como diferentes padrões de uso do solo impactam processos hidrológicos, como escoamento superficial, infiltração, recarga de aquíferos e produção de sedimentos, em bacias hidrográficas de clima semiárido. Além disso, o capítulo apresentará a fundamentação e a escolha da metodologia a ser adotada na pesquisa, discutindo modelos hidrológicos, técnicas de sensoriamento remoto e abordagens integradas que permitam avaliar os efeitos das mudanças de uso e cobertura da terra na disponibilidade hídrica, oferecendo subsídios teóricos e práticos para a condução deste estudo.

2.1. METODOLOGIA DA REVISÃO

Neste estudo, realizou-se uma revisão sistemática com o intuito de fornecer uma análise abrangente da produção científica sobre a relevância do impacto da mudança no uso e na cobertura do solo sobre a disponibilidade de recursos hídricos. Para isso, foi empregada a metodologia *Methodi Ordinatio* (Pagani et al., 2015), uma abordagem estruturada para coleta, classificação e seleção de artigos científicos, escolhida para avaliar as tendências e os desafios existentes nesse campo de pesquisa. O objetivo principal foi identificar as obras-chave, autores, países e tendências emergentes relacionados à investigação sobre a interação entre o uso e cobertura do solo e os recursos hídricos em regiões semiáridas.

Para atingir esse objetivo, foi adotada uma estratégia inicial que consistiu na pesquisa de títulos, resumos e palavras-chave das publicações mais relevantes sobre o tema, no período de 1 de janeiro de 2020 a 2 de março de 2025. A utilização da metodologia *Methodi Ordinatio* seguiu um processo composto por nove fases: (1) definição do objetivo da pesquisa; (2) busca exploratória preliminar do tema em diversas bases de dados; (3) seleção das combinações de palavras-chave e das bases de dados apropriadas; (4) busca efetiva nas bases de dados com as palavras-chave definidas; (5) aplicação de procedimentos de filtragem; (6) análise do fator de impacto dos periódicos, do ano de publicação e do número de citações; (7) classificação dos artigos utilizando a equação *InOrdinatio*; (8) download dos artigos completos; e (9) leitura e análise sistemática dos artigos selecionados.

Fase 1

Intenção da pesquisa: Desenvolver um portfólio abrangente de artigos mais relevantes sobre a análise da importância do uso e da cobertura do solo no estudo dos recursos hídricos.

Fase 2

Pesquisa preliminar com palavras-chave: Na primeira busca realizada nas plataformas *Web of Science (WoS)* e *Scopus*, reconhecidas como líderes na indexação de artigos científicos e acadêmicos, empregaram-se as operações “LULC” AND “Water” AND “Semiarid”. Esta pesquisa inicial possibilitou a seleção de um conjunto de palavras-chave, que foram posteriormente utilizadas na busca definitiva, com base na análise das palavras relevantes identificadas nos artigos recuperados.

Fase 3

Definição e combinação de palavras-chave nas bases de dados: A partir dos artigos previamente identificados, emergiram novas palavras-chave, frequentemente utilizadas pelos autores, como "Land use and land cover", "LULCC" e "Semi-arid". Após análise, um conjunto de palavras-chave foi estabelecido para a consulta final nas bases de dados *Scopus* e *WoS*.

Fase 4

Pesquisa final nas bases de dados: A pesquisa foi conduzida com caracteres específicos e a combinação de palavras-chave estratégicas e operadores booleanos, a fim de realizar uma busca matemática e lógica. As palavras-chave definidas foram empregadas nas consultas às bases de dados *Scopus* e *WoS*, conforme apresentado na Tabela 1. Após a execução da busca, os resultados foram exportados para o formato bibTeX, permitindo a obtenção e a análise das informações no software Bibliometrix, desenvolvido por Aria e Cuccurullo (2017) e fundamentado em R. Ao todo, foram encontrados 201 trabalhos na base Scopus e 163 na base WoS, totalizando 364 trabalhos.

Tabela 1 - Operadores utilizados para o levantamento nas bases de dados da Scopus e Web of Science

Base de dados	Código de consulta
<i>Scopus</i>	(TITLE-ABS-KEY ("Land use and land cover" OR "LULCC" OR "LULCC") AND TITLE-ABS-KEY ("Water") AND TITLE-ABS-KEY ("Semi-arid" OR "Semi-arid"))
<i>Web of Science</i>	(Topic ("Land use and land cover" OR "LULCC" OR "LULCC") AND Topic ("Water") AND Topic ("Semi-arid" OR "Semi-arid"))

Fonte: Autoria própria (2025)

Fase 5

Procedimentos de filtragem: Na Fase 4, realizou-se a coleta integral dos artigos. Foi conduzido um processo de filtragem das informações, com o objetivo de identificar os artigos mais relevantes, que foi dividido em quatro etapas: (I) eliminação de registros duplicados, resultando na remoção de 148 documentos, o que reduziu o total para 216 registros; (II) seleção das publicações classificadas como "Artigo", reduzindo o total para 196; (III) inclusão apenas dos artigos redigidos em inglês ou português, diminuindo o total para 190; (IV) por fim, foi aplicado o Índice *InOrdinatio* (detalhado na Fase 7), o que resultou na seleção final de 32 artigos, que compõem o grupo de análise.

Fase 6

Identificação do Fator de Impacto (FI), ano de publicação e número de citações: Após a obtenção dos artigos finais nas bases de dados (*Scopus* e *WoS*), realizou-se uma análise dos anos de publicação e dos números de citação dos artigos. O Fator de Impacto

(FI) dos periódicos que publicaram os artigos foi obtido a partir das bases de dados *Scopus Source List* e *Journal Citation Reports*.

Fase 7

Classificação do trabalho de pesquisa utilizando a fórmula *InOrdinatio*: Para a execução desta fase, as seis fases anteriores devem ser concluídas, e o Índice *InOrdinatio* é aplicado conforme a Equação (1), considerando as citações. Este coeficiente leva em conta o total de citações (ΣCi), o fator de impacto (IF/1000), o fator de ponderação, determinado de acordo com os critérios estabelecidos pelo pesquisador e que pode variar de 1 a 10, além do ano da pesquisa e da publicação, com o objetivo de classificar os artigos.

$$InOrdinatio = \left(\frac{IF}{1000} \right) + \alpha * [10 - (Ano de pesquisa - Ano de publicação)] + (\Sigma Ci)$$

Equação 1

Onde:

IF = Fator de Impacto da revista.

α = valor do coeficiente (de 1 a 10), que indica a importância do ano do artigo.

Ano de pesquisa = ano em que a investigação é realizada.

Ano de publicação = ano em que o artigo foi publicado.

ΣCi = número total de citações do artigo.

Neste estudo, para a aplicação do Método *InOrdinatio*, foi selecionado um valor de α igual a 10, o que permite identificar os artigos mais relevantes, com ênfase nos mais recentes, atribuindo-lhes maior importância, sem desconsiderar os mais antigos. Essa abordagem visa dar maior destaque e classificar os artigos que abordam as tendências tecnológicas mais atuais e suas aplicações, assumindo que muitos desses artigos se baseiam em trabalhos anteriores para o desenvolvimento dessas aplicações.

Fase 8

Obtenção dos artigos completos: Após a classificação dos artigos com o método *InOrdinatio*, os artigos com acesso aberto foram baixados das bases de dados *WoS* e *Scopus*.

Fase 9

Leitura final e análise sistemática dos artigos: A análise sistemática constitui uma etapa longa e complexa. Visto que para tal, foi tomado por base o Método *InOrdinatio* onde é gerada uma lista ordenada segundo a hierarquia de importância, conforme o resultado obtido pela Eq. (1) na Fase 7. Este processo facilita a seleção dos artigos, permitindo ao pesquisador uma escolha criteriosa e uma leitura final adequada.

2.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.2.1. Análise bibliométrica

Na análise bibliométrica, foi considerado como período para análise o intervalo de 2020 a 2025, e nesse período foram identificados 216 documentos publicados em 114 fontes científicas, conforme a Figura 1. Esses estudos foram conduzidos por 958 autores, o que demonstra um alto nível de colaboração na área. Apenas 4 documentos foram escritos por um único autor, o que indica que a maioria das pesquisas é desenvolvida de forma colaborativa, possivelmente envolvendo equipes multidisciplinares. Além disso, 25,46% das publicações apresentam coautoria internacional, evidenciando a relevância global do tema e a cooperação entre pesquisadores de diferentes países.

Os dados revelam que a pesquisa sobre a influência do uso e da ocupação do solo no semiárido é um campo dinâmico e interdisciplinar, com produção científica em crescimento. A diversidade de fontes e a ampla participação de autores sugerem que o tema tem recebido atenção significativa na literatura acadêmica. Além disso, a presença de estudos interconectados, por meio de redes de coautoria, fortalece o desenvolvimento de novas abordagens e metodologias, promovendo avanços na compreensão dos impactos ambientais nesse ecossistema.

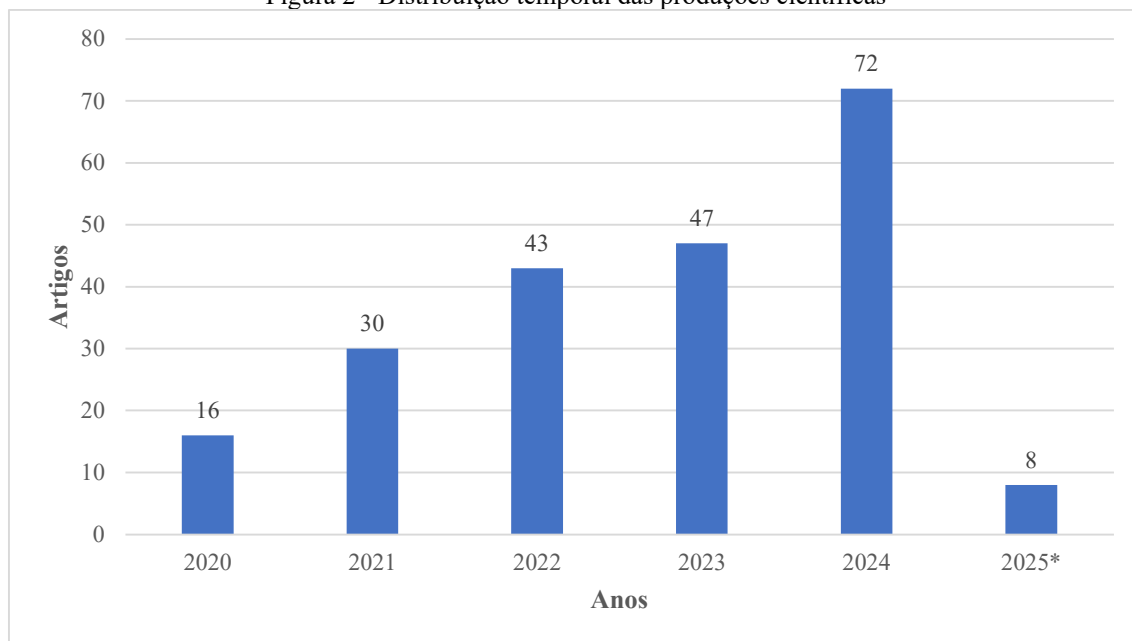
Figura 1 - Visão geral e produção anual de documentos



Fonte: Autoria própria (2025)

A partir dos dados de publicações apresentados na Figura 2, observa-se a distribuição temporal das publicações. Constatou-se que os anos de 2023 e 2024 registraram os maiores volumes de publicações sobre o tema aqui estudado, totalizando 47 e 72 documentos, respectivamente. No ano de 2025, até o dia 2 de março, foram publicados 8 artigos, destacado na Figura 2 com *.

Figura 2 - Distribuição temporal das produções científicas



Fonte: Autoria própria (2025)

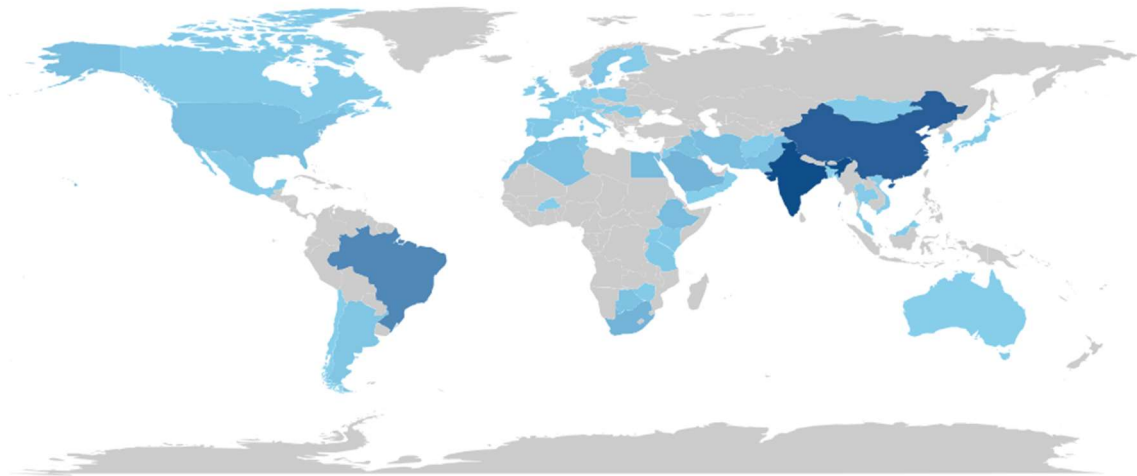
Além disso, a análise bibliométrica revelou que os países com o maior número de publicações sobre o tema são Índia (166), China (142) e Brasil (87). A Figura 3 apresenta a distribuição geográfica desses estudos, em que os países com tonalidades mais azuladas indicam maior produção científica sobre a temática. Essa distribuição reflete a relevância da pesquisa em regiões onde os desafios relacionados à disponibilidade hídrica e às mudanças no uso e ocupação do solo são particularmente críticos.

Em países em desenvolvimento, como a Índia, a rápida intensificação das atividades antropogênicas têm aumentado a pressão sobre os recursos hídricos, acelerando o risco de escassez hídrica (Priya et al., 2023). A Índia abriga 14 grandes bacias hidrográficas, cuja gestão é essencial devido à crescente demanda por água associada ao crescimento populacional e às atividades econômicas (Swain et al., 2022; Pasupuleti et al., 2023). De forma semelhante, às regiões áridas e semiáridas da China enfrentam desafios hídricos significativos, uma vez que a baixa cobertura vegetal, a baixa precipitação e a elevada radiação solar tornam a água o fator limitante mais crítico para a vegetação regional (Jiao et al., 2021; Zhang et al., 2023).

No Brasil, os impactos da disponibilidade hídrica no semiárido nordestino são evidentes, e as condições climáticas e os impactos antrópicos desempenham papel determinante na degradação das terras e na desertificação (Oliveira et al., 2022). Assim como ocorre na Índia e na China, a dinâmica de uso e ocupação do solo no semiárido brasileiro influencia diretamente a resiliência dos ecossistemas e a sustentabilidade dos

recursos hídricos, reforçando a necessidade de estratégias integradas de gestão ambiental nessas regiões.

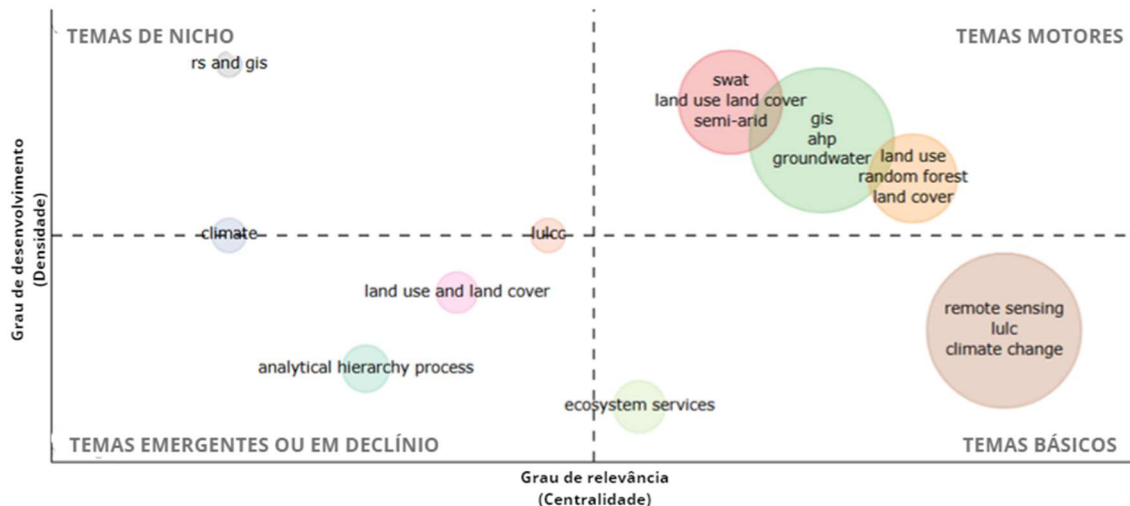
Figura 3 - Distribuição espacial dos documentos relacionados



Fonte: Autoria própria (2025)

O mapa temático da Figura 4, gerado a partir da análise bibliométrica, apresenta a organização das principais palavras-chave associadas à influência do uso e da ocupação do solo em regiões semiáridas. Os temas estão distribuídos em quatro quadrantes: Temas Motores, Temas Básicos, Temas Emergentes ou em Declínio e Temas de Nicho, o que permite uma visão abrangente das tendências e da centralidade dos estudos na área.

Figura 4 - Mapa temático de palavras-chave



Fonte: Autoria própria (2025)

Os temas situados no quadrante de tópicos motores apresentam alta densidade e centralidade, o que indica que se trata de áreas de pesquisa bem estabelecidas e cruciais para o campo de estudos que investiga a influência do uso e da ocupação do solo na disponibilidade hídrica. Nesse contexto, destacam-se termos como "SWAT", "land use

land cover", "semiarid", "GIS", "AHP", "groundwater", "land use", "random forest" e "land cover". A presença do termo "SWAT" (Soil and Water Assessment Tool) indica a ampla utilização do modelo para avaliar os impactos das mudanças no uso e cobertura do solo sobre a disponibilidade de recursos hídricos, conforme demonstrado nos estudos de Khoury et al. (2023), Tola e Shetty (2023) e Gurara et al. (2021). Adicionalmente, ferramentas de geoprocessamento, como o GIS (Do inglês *Geographic Information System*), e técnicas como Random Forest e AHP (Processo Analítico Hierárquico) são essenciais para a análise espacial e para o suporte à tomada de decisão (SHAW; SHARMA, 2024).

Já no quadrante de temas básicos, encontram-se temas com alta centralidade, mas baixa densidade, ou seja, conceitos fundamentais para a área de estudo, mas que, não necessariamente, são os mais inovadores. Destacam-se os termos "remote sensing", "LULC", "climate change", e "ecosystem services". O sensoriamento remoto desempenha papel essencial na análise do uso e da cobertura do solo, sendo uma ferramenta consolidada para o monitoramento ambiental. A relação entre mudanças no uso do solo e variações climáticas também aparece como um tópico fundamental, evidenciando a importância da interação entre esses fatores nos estudos hidrológicos e ambientais.

No quadrante de temas emergentes ou em declínio, estão os temas com baixa densidade e centralidade, podendo representar tendências emergentes ou tópicos em declínio. Os principais termos identificados são "analytical hierarchy process", "land use and land cover" e "climate". A inclusão dos serviços ecossistêmicos pode indicar um crescente interesse na avaliação dos impactos do uso do solo na provisão de bens e serviços ambientais, enquanto o uso do método AHP na tomada de decisão reforça sua aplicabilidade no contexto do planejamento ambiental.

Os temas de nicho apresentam alta densidade, porém baixa centralidade, sugerindo que são tópicos bem desenvolvidos em subáreas específicas. Destacam-se os termos "RS and GIS", indicando que as técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto são exploradas em estudos específicos, mas podem não estar amplamente conectadas com outras áreas dentro da pesquisa sobre uso e ocupação do solo no semiárido.

As palavras-chave "LULCC" (Land Use and Land Cover Change) e "climate" aparecem entre os quadrantes, indicando que possuem características mistas. "LULCC" se posiciona entre os temas de nicho e emergentes, sugerindo que a mudança no uso e na

cobertura do solo é um conceito consolidado, mas que continua a evoluir com novas abordagens. Assim como "climate", mostra que sua relevância pode variar conforme o contexto específico da pesquisa, mas mantém conexão com diversas abordagens da análise ambiental.

A Figura 5 apresenta uma rede de clusters construída com base na coocorrência de palavras-chave extraídas dos artigos científicos analisados. Essa rede tem como objetivo identificar comunidades temáticas a partir da frequência com que os termos aparecem juntos nos estudos. Cada cluster é representado por uma cor, indicando grupos de termos fortemente interconectados, enquanto o tamanho das palavras reflete sua relevância na estrutura da rede. Além disso, as conexões entre os nós evidenciam a inter-relação entre diferentes conceitos, revelando tendências e abordagens recorrentes na literatura.

O cluster representado em vermelho está centrado nos termos "climate-change", "impacts", "runoff" e "model", sugerindo um interesse significativo na relação entre mudanças climáticas e impactos hidrológicos, especialmente no escoamento superficial. A presença de palavras como "china", "índia" e "vegetation" indica que pesquisas realizadas nessas regiões frequentemente exploram a modelagem de cenários climáticos e seus efeitos sobre recursos hídricos e ecossistemas.

Por outro lado, o cluster roxo agrupa conceitos como "land use", "land cover", "semi-arid region" e "groundwater", evidenciando a relevância do uso e da cobertura da terra na disponibilidade hídrica em regiões semiáridas. A inclusão do termo "land use change" reforça o interesse pela dinâmica dessas alterações e pelos impactos dessas alterações sobre o ciclo hidrológico. Além disso, a presença de "remote sensing" indica o uso de técnicas de sensoriamento remoto para monitorar e analisar essas mudanças ao longo do tempo.

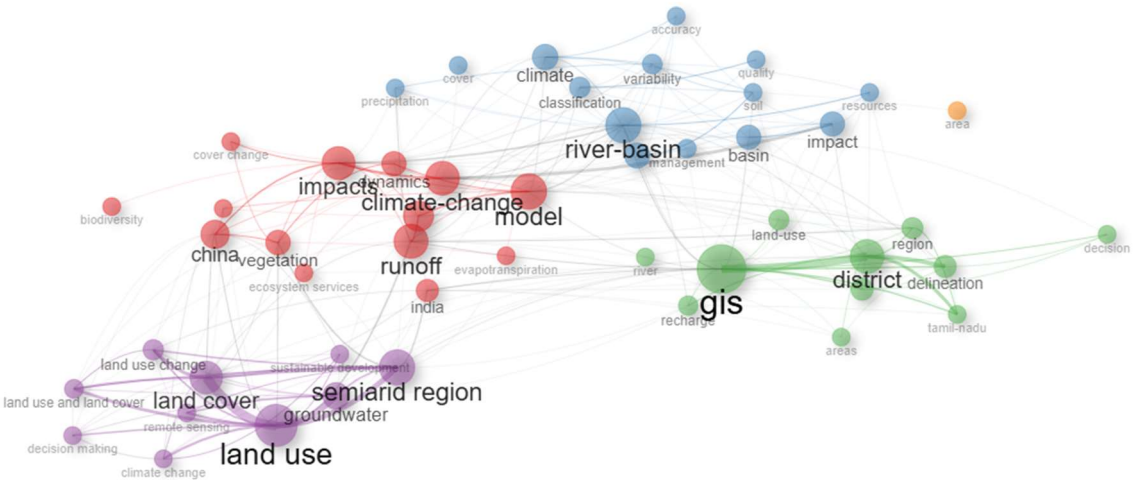
O cluster verde está associado aos termos "GIS" e "district delineation", destacando o papel das ferramentas de geoprocessamento na delimitação de áreas de estudo e na análise espacial. Termos como "região", "land-use" e "decision" sugerem que essas abordagens são amplamente aplicadas no planejamento territorial e na gestão sustentável dos recursos naturais, fornecendo subsídios para a tomada de decisão em políticas ambientais.

Já o cluster azul é estruturado em torno de "river-basin", "climate" e "variability", o que indica um enfoque em estudos que analisam a relação entre mudanças climáticas e variabilidade hidrológica em bacias hidrográficas. A presença de termos como

“precipitation”, “resources” e “impact” reforça o interesse pela disponibilidade hídrica e pela qualidade da água em diferentes contextos climáticos, evidenciando a preocupação com a resiliência dos sistemas hídricos diante das mudanças ambientais.

Por fim, um pequeno grupo identificado na cor laranja, centrado no termo “área”, sugere a delimitação de estudos em regiões semiáridas. Dessa forma, a análise da rede de clusters possibilita uma compreensão abrangente das principais abordagens e tendências da pesquisa científica no tema em estudo.

Figura 5 - Rede de clusters de coocorrência de palavras-chave



Fonte: Autoria própria (2025)

Para organizar as informações referentes aos 32 artigos incluídos na revisão, foi elaborada a Tabela 2 com os 5 principais artigos analisados e os demais estudo estão apresentados no Anexo I, na qual são apresentados os estudos mais relevantes com base na classificação pelo método *InOrdinatio*. A tabela está estruturada em seis colunas, contemplando: autores e ano de publicação, título do artigo, pontuação *da InOrdinatio*, área de estudo e sua extensão territorial, metodologia ou modelo empregado e principais conclusões.

Tabela 2 - Lista de artigos com o ranking *InOrdinatio* e aspectos teóricos

Autores e ano de publicação	Título	<i>InOrdinatio</i>	Área de estudo / Extensão	Metodología / modelo utilizado	Principais conclusões
(Wen; Théau, 2020)	Spatiotemporal analysis of water-related ecosystem services under ecological restoration scenarios: a case study in northern shaanxi, china	74,55	Norte de Shaanxi / 16.581,21 km²	Modelo Markov-Cellular Automata (CA) e modelo de produção de água Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST)	O rendimento de água diminuiu para os cenários, indicando que as mudanças climáticas e restauração ecológica pressionarão a água até 2050.

Autores e ano de publicação	Título	<i>InOrdinatio</i>	Área de estudo / Extensão	Metodologia / modelo utilizado	Principais conclusões
Al-Ghobari; (Dewidar; Alataway, 2020)	Estimation of surface water runoff for a semi-arid area using rs and gis-based scs-cn method	74,00	Bacia Wadi-Uranah / 2.121,5 km ²	Método do SCS Intersecção de Shapefiles de LULC e grupo de solo hidrológico (HGS) utilizando o ambiente GIS	O estudo utilizou GIS, RS e o modelo SCS-CN para estimar o escoamento superficial na bacia de Wadi-Uranah, Arábia Saudita, destacando que o grupo HSG predominante foi o C, cobrindo 98,8% da área. Os resultados indicaram que o escoamento varia com o uso da terra e a permeabilidade do solo, com picos de 828, 1353 e 1603 m ³ /s para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos. Respectivamente e o modelo SCS-CN se mostrou eficaz para o estudo de bacias na região.
(Sharma; Patel; Sharma, 2022)	Influence of climate and land-use changes on the sensitivity of swat model parameters and water availability in a semi-arid river basin	61,33	Bacia de Dharoi / 5.286 km ²	SWAT	O estudo revelou que a mudança climática é o principal fator que afeta o fluxo de água e os parâmetros hidrológicos na bacia de Dharoi, com aumento da precipitação e risco de inundações. A mudança no uso da terra teve impacto menor, e o modelo mostrou bom desempenho.

Autores e ano de publicação	Título	<i>InOrdinatio</i>	Área de estudo / Extensão	Metodologia / modelo utilizado	Principais conclusões
(Xu et al., 2022)	Assessing the impacts of grain-for-green programme on ecosystem services in jinghe river basin, china	50,23	Bacia do rio Jinghe / 44.890 km ²	InVEST	O estudo avaliou o impacto do projeto GFGP na Bacia do Rio Jinghe, mostrando redução no rendimento hídrico e exportação de sedimentos, mas aumento no armazenamento de carbono. Compensações entre serviços ecossistêmicos foram observadas, destacando que gramíneas são mais eficazes que árvores em áreas áridas. O estudo sugere otimizar o uso da terra em projetos de restauração ecológica.
(Mararakanye; Le Roux; Franke, 2022)	Long-term water quality assessments under changing land use in a large semi-arid catchment in South Africa	44,55	Bacia do rio Vaal / 7.220 km ²	SWAT	O estudo destacou que a agricultura irrigada e de sequeiro contribuem para a poluição da água na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Vaal, com aumento das cargas de nutrientes de 1980 a 2018. A gestão adequada das práticas agrícolas e a redução da lixiviação de nutrientes são para controlar a eutrofização. A contribuição de áreas construídas é menor.

2.2.2. Principais conclusões dos artigos avaliados

Dentre os artigos analisados, o foco da pesquisa esteve na avaliação da disponibilidade hídrica, da qualidade da água, da drenagem, dos serviços ecossistêmicos e da erosão do solo. No que diz respeito aos objetivos comuns, destaca-se a análise dos fatores antropogênicos e climáticos e de sua influência sobre os recursos hídricos em diferentes regiões do mundo. A maioria dos estudos utilizou bacias hidrográficas como unidades de análise, aplicando modelos hidrológicos como SWAT (Sharma et al., 2022; Mararakayne et al., 2022; Dolgorsuren et al., 2024), SCS-CN (Al-Ghobari et al., 2020), e abordagens baseadas em sensoriamento remoto e GIS (Govender; Dube; Shoko, 2022).

Os impactos da mudança no uso e na cobertura da terra (LULC) sobre a disponibilidade hídrica associada às variações climáticas foram amplamente documentados. Estudos realizados na China indicam que restauração ecológica e programas de reflorestamento, como o *Grain-for-Green Program*, podem reduzir o rendimento hídrico e a produção de sedimentos, ao mesmo tempo em que aumentam o armazenamento de carbono, o que demanda estratégias de manejo adaptativas (Wen; Théau, 2020; Xu et al., 2022; Yi et al., 2023). De forma similar, na Índia, a aplicação do modelo SWAT revelou que as mudanças climáticas exercem maior impacto na disponibilidade hídrica do que as alterações no uso da terra, aumentando o risco de inundações e de escassez hídrica (Sharma et al., 2022; Kumar; Singh; Gaurav, 2022). No Brasil, o semiárido apresenta desafios relacionados à degradação do solo e variabilidade hídrica, com pesquisas apontando para a necessidade de gestão sustentável dos reservatórios e medidas de adaptação à seca (Silva et al., 2021).

Além disso, a poluição da água, devido à intensificação agrícola, foi observada em diversas regiões semiáridas, como a bacia do Rio Vaal, na África do Sul, onde práticas inadequadas de irrigação resultaram no aumento da carga de nutrientes e risco de eutrofização (Mararakayne et al., 2022). Estudos em regiões áridas da Arábia Saudita e da América do Sul também indicaram que mudanças no uso da terra afetam o balanço hídrico e a capacidade de infiltração do solo, alterando os padrões de escoamento e recarga subterrânea (Al-Ghobari et al., 2020; Giménez et al., 2020). Modelos preditivos baseados em inteligência artificial, como os utilizados na bacia do Rio Limpopo, mostraram-se promissores para prever níveis de barragens e impactos climáticos (Ouma et al., 2022). Os achados ressaltam a necessidade de estratégias de conservação e

planejamento hídrico para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e do crescimento populacional sobre os recursos hídricos globais.

2.2.3. Principais modelos e metodologias utilizados nos trabalhos avaliados

Com o avanço da Internet das Coisas (IoT, do inglês Internet of Things), a instrumentação hidrológica tem se tornado progressivamente mais densa e automatizada, permitindo a coleta contínua e em tempo quase real de variáveis fundamentais, como precipitação, vazão, nível dos rios e umidade do solo. Essa ampliação na disponibilidade e na resolução dos dados observados tem favorecido significativamente a calibração, validação e atualização dinâmica de modelos hidrológicos, ampliando sua aplicação na previsão do comportamento dos recursos hídricos em diferentes regiões e sob distintos cenários hidrológicos e climáticos (Khansa Gulshad; Michał Szydlowski; Mustafa, 2024).

Nesse contexto, diversos modelos hidrológicos vêm sendo amplamente empregados na literatura científica. Destacam-se os esquemas de transferência entre atmosfera, vegetação e solo, bem como o modelo de capacidade de infiltração variável (Variable Infiltration Capacity – VIC) (Dash et al., 2021). A versatilidade do modelo VIC tem favorecido sua aplicação em estudos de balanço hídrico, permitindo avaliar de forma integrada os efeitos das mudanças climáticas e do uso e cobertura da terra (Land Use and Land Cover – LULC) em diferentes localidades (Dash et al., 2021).

Paralelamente, outros modelos hidrológicos têm sido utilizados para simular processos hidrológicos em bacias com diferentes níveis de disponibilidade de dados. Slieman e Kozlov (2023), por exemplo, analisaram o uso do modelo MIKE na modelagem do escoamento da bacia do rio Orontes, na Síria, em condições de escassez de dados. Os resultados evidenciaram grandes erros e baixa confiabilidade, atribuídos principalmente à qualidade limitada dos dados disponíveis, levando os autores a sugerirem a integração do MIKE com outros modelos para aprimorar seu desempenho. Essa abordagem híbrida mostrou-se promissora no estudo de Nguyen e Bui (2023), que combinaram os modelos SWAT e MIKE para avaliar a qualidade da água e a capacidade ambiental do rio Ben Tuong, obtendo resultados satisfatórios.

Outros trabalhos têm explorado diferentes modelos distribuídos para analisar impactos hidrológicos associados às mudanças climáticas e ao uso da terra. Koch et al. (2020) utilizaram o European Soil and Water Integrated Model (SWIM) para simular projeções climáticas na bacia do rio Pajeú, identificando alterações no escoamento superficial e no fluxo natural do rio. De forma complementar, Mebrahte et al. (2024)

aplicaram o modelo Water and Energy Transfer between Soil, Plants, and Atmosphere (WetSpa) para investigar os efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra sobre o potencial hidrelétrico da bacia do alto Geba, na Etiópia. Mais recentemente, Wu et al. (2024) aprimoraram o desempenho do WetSpa por meio de técnicas de aprendizado profundo, incorporando informações relacionadas às atividades de uso da água na área de estudo.

Além dos modelos conceituais e fisicamente baseados, estudos recentes também têm integrado técnicas de sensoriamento remoto, estatística e aprendizado de máquina à modelagem hidrológica. Raúl Giménez et al. (2020) desenvolveram um modelo solo-água no ambiente R para simular a distribuição da precipitação entre processos hidrológicos fundamentais, como evaporação, transpiração, escoamento e armazenamento de umidade no solo, utilizando dados do produto MOD13Q1. De modo semelhante, Ouma et al. (2022) aplicaram modelos estatísticos e de aprendizado de máquina como Regressão Linear Multivariada (MLR), Auto Regressivo Vetorial Estocástico (VAR), Regressão por Floresta Aleatória (RFR) e Redes Neurais Artificiais (ANN) para prever a variabilidade dos níveis de água em barragens de Botsuana.

No âmbito da modelagem de cenários futuros, Wen e Théau (2020) avaliaram mudanças no uso e cobertura da terra, bem como projeções de precipitação, temperatura, erosão do solo e produção de água no norte de Shaanxi, na China. Para isso, utilizaram o modelo Markov-Cellular Automata (CA) na geração de cenários de LULC, os quais serviram de entrada para a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) e para o modelo de produção de água Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST). O estudo teve como objetivo avaliar os impactos de programas de restauração ecológica sobre a erosão do solo e a produção hídrica até 2050.

Em abordagens mais simplificadas, porém amplamente difundidas, destaca-se a integração do método do número da curva do Serviço de Conservação do Solo (SCS-CN) com Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e dados de sensoriamento remoto. Al-Ghobari, Dewidar e Alataway (2020) aplicaram essa metodologia para estimar o escoamento superficial na bacia do Wadi-Uranah, na Arábia Saudita, a partir da elaboração de mapas temáticos de declividade, grupos hidrológicos do solo, uso e cobertura da terra e precipitação diária, possibilitando a geração dos valores do número da curva (CN) e dos mapas de escoamento.

No que se refere aos modelos de superfície terrestre, Paulo et al. (2024) analisaram o desempenho de modelos como JULES, ORCHIDEE, HTESSEL, SURFEX e PCR-

GLOBWB, destacando o papel da precipitação, do clima e da cobertura do solo nos processos de evaporação e escoamento. Os autores observaram que modelos baseados em regressão por Random Forest (RF) apresentaram elevado desempenho na reprodução das saídas hidrológicas, embora tenham sido identificadas divergências na determinação dos fatores que controlam os processos de escoamento superficial e subterrâneo.

Entre os modelos hidrológicos analisados na presente revisão, o Soil and Water Assessment Tool (SWAT) destacou-se como o mais empregado. Dos 32 artigos avaliados, 17 utilizaram o SWAT, representando mais da metade das aplicações identificadas. Essa ampla adoção reflete sua versatilidade e capacidade de aplicação em bacias de diferentes escalas (Yuan et al., 2020). O SWAT tem sido amplamente utilizado para simular a disponibilidade hídrica, a qualidade da água, a erosão do solo e os impactos das mudanças no uso e cobertura da terra, como demonstrado por Nguyen e Bui (2023) na integração com o modelo MIKE. Além disso, o modelo tem sido aplicado na avaliação de respostas hidrológicas a diferentes cenários climáticos e de manejo da terra, fornecendo subsídios importantes para o planejamento sustentável dos recursos hídricos (Yuan et al., 2020).

A análise bibliométrica realizada evidencia um crescimento expressivo no número de publicações que investigam a relação entre mudanças no uso da terra e a disponibilidade hídrica, especialmente em regiões semiáridas. Entre 2020 e 2025, observa-se uma tendência de intensificação do uso de modelos hidrológicos distribuídos, como SWAT, InVEST e WetSpa, para estimar os impactos dessas mudanças sobre a quantidade e a qualidade da água (Wen e Théau, 2020; Sharma et al., 2022). Estudos indicam que a substituição da vegetação natural por atividades agropecuárias e urbanas tem promovido o aumento do escoamento superficial e da erosão, comprometendo a infiltração e a recarga aquífera (Mararakanye et al., 2022; Kumar; Singh; Gaurav, 2022). Do ponto de vista geográfico, destacam-se pesquisas em bacias semiáridas da Índia, da China e do Brasil, onde os efeitos da escassez hídrica são particularmente intensos (Jiao et al., 2021; Silva et al., 2021), embora persistam desafios relacionados à integração de dados e à calibração de modelos em ambientes com elevada variabilidade climática (Govender; Dube; Shoko, 2022).

Diante desse panorama, e visando atender ao segundo objetivo específico desta dissertação, adota-se como referência metodológica o estudo de Tanksali e Soraganvi (2020), que aplicaram o modelo hidrológico SWAT, implementado por meio do QSWAT no ambiente QGIS, para avaliar os impactos das mudanças no uso e cobertura da terra

sobre os processos hidrológicos em uma bacia semiárida. A metodologia proposta baseia-se na preparação integrada de dados topográficos, pedológicos, climáticos e de uso da terra, na delimitação da bacia e definição das Unidades de Resposta Hidrológica, na simulação do balanço hídrico e na avaliação de cenários contrastantes de LULC, associadas à calibração e validação do modelo com o auxílio do SWAT-CUP e de indicadores estatísticos de desempenho. Essa abordagem será adaptada à área de estudo da presente pesquisa, permitindo uma análise consistente dos efeitos das mudanças no uso e ocupação do solo sobre a vazão, a lâmina escoada e a produção de sedimentos, considerando as particularidades ambientais e climáticas do semiárido paraibano.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliométrica revelou que os impactos das mudanças no uso e cobertura da terra (LULC) estão fortemente associados à redução da infiltração, ao aumento do escoamento superficial e à deterioração da qualidade da água. Esses efeitos foram observados de forma recorrente em bacias hidrográficas de diferentes dimensões, abrangendo desde pequenas bacias experimentais até grandes sistemas regionais, e sob distintos contextos climáticos, com destaque para regiões semiáridas, onde a alteração da cobertura vegetal e a intensificação do uso antrópico tendem a amplificar a resposta hidrológica. Essa diversidade de escalas analisadas nos estudos revisados evidenciou que os efeitos do LULC sobre a disponibilidade hídrica não são homogêneos no espaço, reforçando a necessidade de abordagens distribuídas e espacialmente explícitas.

Nesse contexto, modelos hidrológicos baseados em processos, como SWAT, MIKE-SHE e InVEST, destacaram-se pela ampla aplicação na literatura, sobretudo por permitirem a simulação integrada de processos hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais. A recorrência do uso do SWAT em estudos aplicados a regiões semiáridas, aliada à sua capacidade de incorporar variáveis de solo, relevo, clima, uso da terra e intervenções antrópicas, foi um dos principais fatores que fundamentaram a escolha desse modelo no presente trabalho.

Para além da seleção do modelo, a revisão evidenciou uma ampla diversidade de variáveis hidrológicas analisadas pelos autores, incluindo vazão média, vazões máximas e mínimas, escoamento superficial, recarga subterrânea, evapotranspiração e indicadores relacionados à erosão e à produção de sedimentos. Observou-se ainda que muitos estudos adotaram análises comparativas entre cenários passados, atuais e futuros de uso e

cobertura da terra, bem como cenários com e sem intervenções antrópicas, como reservatórios e práticas de conservação.

No que se refere às abordagens metodológicas, os estudos analisados empregaram de forma recorrente o sensoriamento remoto e a análise multitemporal de imagens orbitais para mapear a dinâmica do LULC, frequentemente associadas a técnicas de classificação supervisionada e algoritmos de aprendizado de máquina. Essas informações espaciais foram integradas às análises hidrológicas tanto por meio de modelos estatísticos quanto como dados de entrada em modelos hidrológicos distribuídos. A recorrência dessas abordagens na literatura fundamentou a adoção de produtos de uso e cobertura da terra multitemporais como base para a construção dos cenários simulados neste estudo.

Complementarmente, uma parcela significativa dos trabalhos utilizou métodos empíricos espacialmente distribuídos, como o SCS–Curve Number (CN), integrados a ambientes de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), para representar a geração de escoamento superficial em função do uso do solo, do tipo de solo, do relevo e da precipitação. A análise crítica desses estudos contribuiu para a compreensão dos parâmetros mais sensíveis associados aos processos de escoamento e infiltração, subsidiando a seleção dos parâmetros priorizados no processo de calibração do modelo hidrológico.

A revisão também evidenciou o uso crescente de análises de cenários futuros, integrando projeções de mudanças no uso e na cobertura da terra e cenários climáticos, com o objetivo de avaliar impactos potenciais sobre a disponibilidade hídrica, a erosão do solo e outros serviços ecossistêmicos. A diversidade de cenários explorados pelos autores reforçou a importância de análises comparativas entre diferentes configurações de uso da terra, o que foi incorporado ao desenho metodológico do presente estudo, permitindo avaliar respostas hidrológicas sob distintas condições de ocupação e manejo da bacia.

Dessa forma, a revisão bibliométrica não se limitou à sistematização do estado da arte, mas exerceu papel decisivo na orientação das escolhas metodológicas desta pesquisa, influenciando a seleção do modelo hidrológico, das variáveis analisadas, da escala espacial de avaliação, dos parâmetros calibrados e da estrutura de cenários simulados. Essa articulação entre revisão e metodologia confere maior robustez, transparência e auditabilidade ao estudo, além de alinhar o trabalho às práticas consolidadas na literatura científica sobre impactos das mudanças no uso e cobertura da terra na disponibilidade hídrica em regiões semiáridas.

CAPÍTULO 3

Neste capítulo, será apresentada uma descrição detalhada do modelo hidrológico utilizado no estudo. Será abordada também as métricas empregadas para a calibração e validação do modelo, como R^2 , NSE, RSR e PBIAS. Além disso, o capítulo apresentará a metodologia adotada, detalhando a área de estudo e os procedimentos para obtenção, processamento e tratamento dos dados de entrada necessários para a realização das análises, incluindo informações sobre uso e cobertura do solo, dados climáticos e características fisiográficas da bacia.

3.1. DESCRIÇÃO DO MODELO SWAT

O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), desenvolvido pelo *Agricultural Research Service* do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (ARS-USDA), é amplamente empregado em estudos hidrológicos em escala de bacia hidrográfica. Trata-se de um modelo hidrológico de base física e de natureza semidistribuída, capaz de representar a dinâmica integrada de diversos processos ambientais e agro-hidrológicos ao longo do tempo (Arnold et al., 1998).

Uma de suas principais potencialidades reside na possibilidade de discretização espacial da bacia em sub-bacias e, posteriormente, em unidades hidrológicamente homogêneas, permitindo a representação adequada de áreas com solos, relevo e cobertura do solo contrastantes, cujas características influenciam diretamente o uso da terra e o comportamento hidrológico (Hari Krishna et al., 2014). Essa abordagem possibilita a decomposição dos principais elementos físicos da bacia: tipo de solo, cobertura do solo e declividade, em Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), nas quais são simulados os componentes do ciclo hidrológico e, posteriormente, integrados à escala da sub-bacia.

O modelo reproduz, em base diária, os principais fluxos hidrológicos, incluindo evapotranspiração, escoamento superficial, percolação, fluxo lateral, contribuição do aquífero (fluxo de base) e perdas por transmissão, permitindo a avaliação detalhada do balanço hídrico em nível de bacia (Arnold et al., 1998). O escoamento superficial é estimado pelo método do Número de Curva (Curve Number – CN), baseado nos parâmetros do *Soil Conservation Service* (SCS) e amplamente reconhecido na modelagem hidrológica.

O componente do ciclo hidrológico baseia-se na Equação 2 do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Equação 2

A quantidade final de água no solo da camada da zona radicular no tempo t (SW_t), expressa em milímetros, resulta da quantidade inicial de água no solo no dia i (SW_0), considerada ao longo de um período de simulação com duração t dias. Esse balanço é influenciado pela quantidade de precipitação ocorrida no dia i (R_{day}), pelo escoamento superficial gerado no mesmo dia (Q_{surf}), pela evapotranspiração diária (E_a), pela percolação da água da zona radicular para a zona não saturada (W_{seep}) e pelo fluxo de

retorno do aquífero, correspondente às águas subterrâneas que contribuem para o sistema no dia i (Q_{gw}), sendo todas essas variáveis expressas em milímetros.

Na escala das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), o escoamento superficial ocorre quando a intensidade da precipitação efetiva supera a capacidade de infiltração do solo. Sua estimativa foi realizada por meio de adaptações do método do CN, proposto pelo Soil Conservation Service (SCS). Esse procedimento considera as condições antecedentes de umidade, as propriedades físicas do solo, o tipo de cobertura vegetal e outras características fisiográficas da bacia, incluindo a topografia. O método SCS-CN permite a quantificação do escoamento superficial a partir dessas variáveis, sendo o valor de Q_{surf} determinado conforme a formulação apresentada na Equação 3:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2 S)^2}{(R_{day} + 0.8 S)}$$

Equação 3

Onde Q_{surf} corresponde ao excedente de precipitação, expresso em milímetros, R_{day} representa a lâmina diária de precipitação (mm dia^{-1}) e S denota o parâmetro de retenção do solo, também em milímetros.

O parâmetro S é influenciado por alterações no uso e cobertura da terra, pelas condições de umidade antecedente, pela declividade do terreno e, conseqüentemente, apresenta variabilidade espacial ao longo da bacia hidrográfica. Sua determinação é realizada conforme a expressão apresentada na Equação 4:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} \right) - 10$$

Equação 4

Onde S é o parâmetro que representa a retenção em mm, e (CN) representa o número da curva, sendo este último dependente da permeabilidade do solo em relação às condições anteriores do solo e ao uso da terra. O número da curva (CN) é fornecido por tabelas disponíveis na literatura para combinar tipos de solo e uso da terra na bacia hidrográfica.

3.1.1. QSWAT: uma interface de código aberto para SWAT

O QSWAT é uma interface de código aberto, desenvolvida em Python e integrada ao ambiente QGIS, destinada a ampliar as funcionalidades de processamento do modelo SWAT. Suas operações são organizadas em módulos responsáveis pelo controle do

sistema e pela execução das principais rotinas do modelo. Os procedimentos de geoprocessamento baseiam-se em Modelos Digitais de Elevação (MDE), que constituem o suporte fundamental para as etapas subsequentes de delineamento hidrológico e espacialização dos parâmetros. O processamento paralelo é viabilizado por meio da interface de passagem de mensagens, o que contribui para a redução do tempo computacional associado ao tratamento dos dados topográficos. Adicionalmente, o QSWAT estrutura o diretório do projeto de forma hierárquica, assegurando a integridade dos arquivos de entrada ao longo do processamento.

O QSWAT permite a agregação de sub-bacias de menor porte e a exclusão de URHs consideradas irrelevantes, sem comprometer a consistência dos resultados. Os produtos do modelo podem ser avaliados por meio de representações gráficas e visualizações estáticas ou dinâmicas, facilitando a análise comparativa entre as séries simuladas e os dados observados.

3.1.2. Calibração e validação do modelo SWAT (SWAT-CUP)

O SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Procedures), desenvolvido por Abbaspour et al. (2007), constitui uma plataforma amplamente empregada para a realização de análises de sensibilidade, calibração, validação e avaliação de incertezas em modelos baseados no SWAT. O sistema incorpora diferentes abordagens metodológicas, incluindo Cadeias de Markov Monte Carlo (MCMC), estimação de máxima verossimilhança generalizada (GLUE), solução paramétrica (Parasol) e o algoritmo de ajuste sequencial de incerteza (SUFI-2).

No ambiente do SWAT-CUP, é possível definir, para cada parâmetro calibrado, o método de alteração aplicado aos valores originais do modelo. Três opções estão disponíveis: o método R (*Relative*), no qual o valor existente é multiplicado por um fator de ajuste; o método V (*Replace*), que substitui diretamente o valor original do parâmetro; e o método A (*Add*), que adiciona um incremento ao valor inicial. Essa flexibilidade permite adaptar o procedimento de calibração às características físicas de cada parâmetro e às necessidades específicas do estudo.

Entre os algoritmos disponíveis, o SUFI-2 destaca-se por sua eficiência na previsão de vazões e na quantificação das incertezas associadas às simulações hidrológicas (Wafae El Harraki et al., 2021). Esse método tem sido amplamente utilizado em estudos de calibração, sensibilidade e análise de incerteza em bacias hidrográficas (Abbaspour et al., 2017; Tanksali & Soraganvi, 2020).

A identificação dos parâmetros mais sensíveis é realizada a partir dos indicadores estatísticos t-stat e p-value, nos quais o valor de p expressa o nível de significância da sensibilidade, enquanto o t-stat representa sua magnitude. Parâmetros associados a maiores valores absolutos de t-stat e a valores de p próximos de zero são considerados mais influentes no processo de calibração (Chen et al., 2020; Demissie, 2022).

3.1.3. Avaliação de desempenho do modelo SWAT

Diferentes indicadores de desempenho, tais como o coeficiente de eficiência de Nash–Sutcliffe (NSE) e o viés percentual (PBIAS), são utilizados para examinar a capacidade do modelo em representar de forma adequada os processos hidrológicos. A aplicação dessas métricas estatísticas permite verificar se o desempenho das simulações pode ser considerado satisfatório, evidenciando a aptidão do SWAT em reproduzir de forma consistente as respostas hidrológicas observadas (Arnold et al., 1998; Gupta et al., 1999). A qualidade do ajuste entre as vazões simuladas e observadas foi analisada com base em diferentes indicadores de desempenho consagrados na literatura, incluindo o coeficiente de eficiência de Nash–Sutcliffe (NSE), definido na Equação (5), o viés percentual (PBIAS), descrito na Equação (6) (Junqueira et al., 2022), o coeficiente de determinação (R^2), apresentado na Equação (7), e o índice RSR, apresentado na Equação (8) (Ferreira, Paz & Bravo, 2020).

O NSE indica o grau de adequação entre os dados observados (Q_{obs}) e simulados (Q_{sim}), dado pela seguinte Equação (5):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

Equação 5

O NSE avalia a capacidade do modelo em reproduzir as vazões observadas em relação à média da série histórica, quantificando a proporção da variância dos dados explicada pela simulação. Esse índice assume valores entre $-\infty$ e 1, sendo que valores próximos de 1 indicam excelente desempenho, enquanto valores iguais ou inferiores a zero indicam que a média observada constitui um melhor preditor do que o próprio modelo.

De acordo com critérios amplamente adotados na literatura, valores de NSE inferiores a 0,50 caracterizam desempenho insatisfatório, enquanto valores superiores a 0,50 são considerados satisfatórios e aqueles acima de 0,75 classificados como muito bons (Moriasi et al., 2007). Em função de sua robustez e facilidade de interpretação, o

NSE é amplamente empregado na avaliação do ajuste entre séries de vazão simuladas e observadas (Le & Pricope, 2017).

O PBIAS (Equação 6) avalia a tendência média das séries simuladas em relação às observadas, indicando se o modelo apresenta comportamento de subestimação ou superestimação das vazões. Esse indicador assume valores positivos ou negativos, sendo o valor nulo associado ao desempenho ideal da simulação. Valores positivos caracterizam subestimação sistemática, enquanto valores negativos indicam superestimação por parte do modelo.

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}$$

Equação 6

Onde Q_{obs} e Q_{sim} representam as vazões observadas e simuladas, respectivamente, e n corresponde ao número de observações consideradas. O PBIAS expressa o erro percentual médio das simulações, sendo que valores absolutos mais próximos de zero indicam melhor ajuste entre as séries, enquanto sinais positivos ou negativos refletem, respectivamente, subestimação ou superestimação dos valores simulados (Zhang et al., 2020). Esse índice é amplamente utilizado em estudos hidrológicos por possibilitar a identificação direta de vieses sistemáticos no desempenho do modelo (Bennett et al., 2013).

O coeficiente de determinação (R^2) representado pela Equação 7 é utilizado para avaliar o grau de associação linear entre as vazões observadas e aquelas simuladas pelo modelo. Esse indicador assume valores entre 0 e 1 e expressa a fração da variabilidade dos dados observados explicada pelas simulações, sendo que valores mais elevados indicam maior capacidade do modelo em reproduzir os padrões de variação temporal das séries hidrológicas (Anouar Hachemaoui et al., 2022).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim,t}})(Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs,t}})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim,t}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs,t}})^2}$$

Equação 7

Apesar de sua utilidade na análise de correlação, o R^2 não fornece informações sobre a magnitude dos erros nem sobre a presença de vieses sistemáticos, podendo apresentar valores elevados mesmo em situações de superestimação ou de subestimação consistentes das vazões.

Por sua vez, o índice RSR, apresentado na Equação (8), relaciona a raiz do erro quadrático médio (RMSE) ao desvio padrão das observações, resultando em uma métrica adimensional que expressa o erro residual normalizado pela variabilidade dos dados observados. Valores de RSR próximos de zero indicam melhor desempenho do modelo, enquanto valores mais elevados refletem maior discrepância entre as séries simuladas e observadas. Em função de sua capacidade de sintetizar, em um único indicador, a magnitude do erro e a variabilidade dos dados, o RSR é particularmente útil para a comparação entre diferentes modelos, períodos de simulação ou bacias hidrográficas (Ferreira, Paz & Bravo, 2020).

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs,i}})^2}}$$

Equação 8

A Tabela 3 apresenta as funções objetivo e suas classificações quanto ao desempenho.

Tabela 3 - Funções objetivo e suas classificações quanto ao desempenho do modelo

Classificação	NSE	PBIAS (%)	R ²	RSR
Muito boa	0,75 < NSE < 1,00	PBIAS < +- 10	0,75 < R ² < 1,00	0,00 < RSR < 0,50
Boa	0,65 < NSE < 0,75	+ - 10 < PBIAS < +- 15	0,65 < R ² < 0,75	0,50 < RSR < 0,60
Satisfatória	0,50 < NSE < 0,65	+ - 15 < PBIAS < +- 25	0,50 < R ² < 0,65	0,60 < RSR < 0,70
Insatisfatória	0,50 < NSE	PBIAS > +- 25	R ² < 0,50	RSR > 0,70

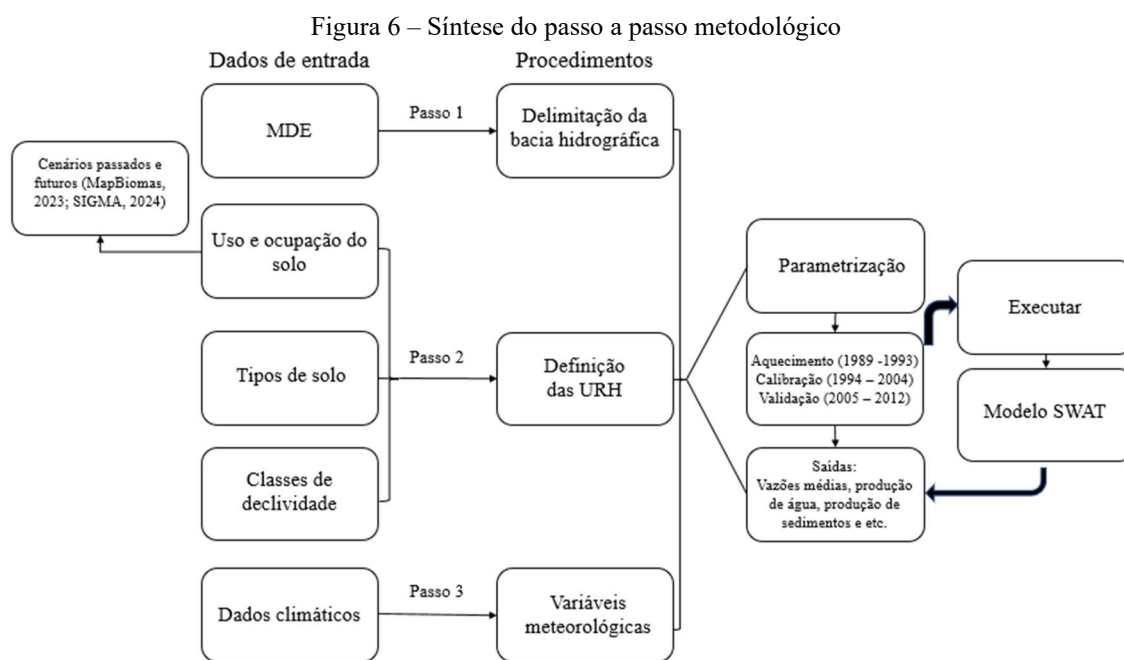
Fonte: Moriasi et al., (2007)

3.2. METODOLOGIA

Nesta pesquisa, a metodologia proposta por Tanksali e Soraganvi (2020) é adotada como referência, conforme discutido no capítulo de revisão, sendo ajustada às especificidades da área de estudo e aos objetivos desta dissertação. Em particular, a análise dos diferentes cenários de uso e ocupação do solo, tanto históricos quanto projetados para o futuro, será realizada com base em dados do Projeto SIGMA – Segurança Hídrica de Municípios Paraibanos: uma Modelagem Integrada da Variabilidade Climática e das Dinâmicas Naturais e Antrópicas, no qual o autor está inserido, permitindo a elaboração de cenários que representem de forma consistente as condições atuais e futuras da bacia. Essa abordagem possibilita avaliar a evolução desses

cenários e seus impactos na disponibilidade hídrica da área de estudo, considerando variáveis hidrossedimentológicas.

O encadeamento das etapas metodológicas está sintetizado no fluxograma apresentado na Figura 6, enquanto a descrição detalhada da área de estudo, bem como os procedimentos para obtenção e tratamento dos dados de entrada, são apresentados nas seções subsequentes.



Fonte: Autoria própria (2025)

3.3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à bacia de contribuição do Sistema Hídrico Poções–Epitácio Pessoa (SHPoEP), localizada no estado da Paraíba, inserida no contexto do semiárido brasileiro. Essa região é marcada por elevada variabilidade espaço-temporal da precipitação, recorrência de longos períodos de estiagem e ocorrência de secas severas, condições que impõem restrições significativas à disponibilidade hídrica superficial e subterrânea (Marengo et al., 2022; ANA, 2023). Nesse cenário, o SHPoEP assume um papel estratégico na regulação e no suprimento de água para o abastecimento humano, nas atividades produtivas e na manutenção das funções socioambientais.

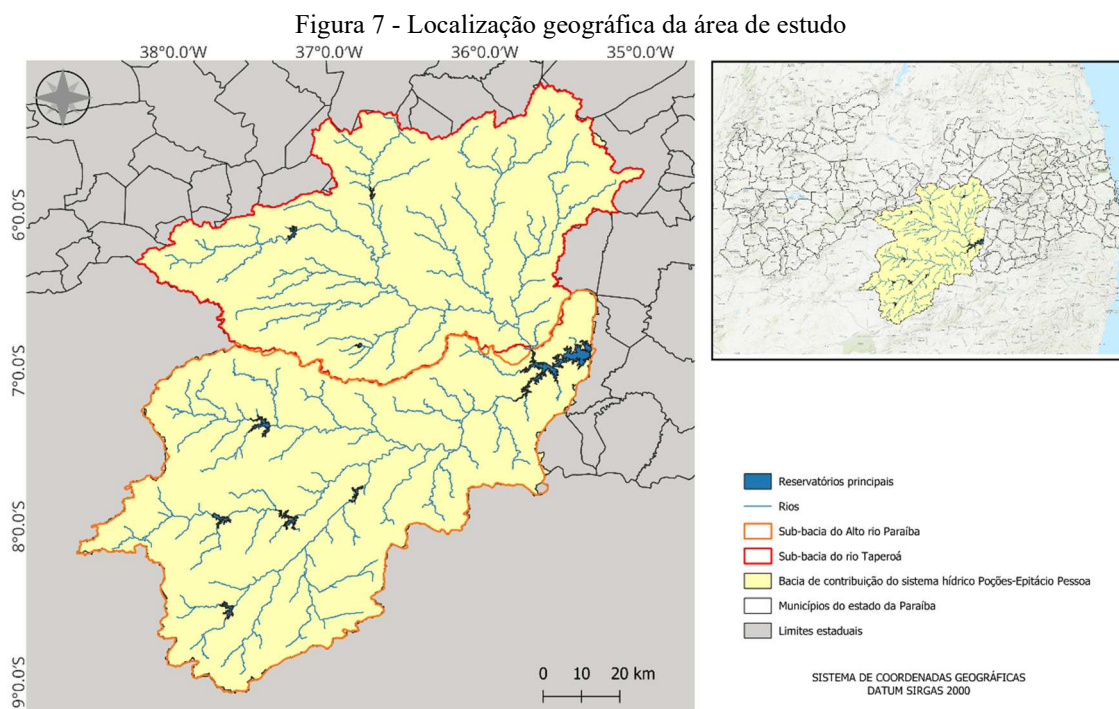
O sistema é constituído por duas sub-bacias, a do rio Taperoá e a do Alto rio Paraíba (Figura 7), que exercem funções complementares. Nessas áreas, o escoamento superficial e subsuperficial é parcialmente utilizado localmente e parcialmente direcionado ao açude Epitácio Pessoa, responsável pelo atendimento das demandas

regionais. Essa configuração favorece a análise integrada dos processos hidrológicos e de seus reflexos na disponibilidade hídrica em um ambiente marcado por escassez estrutural (Silva et al., 2021; ANA, 2023).

Administrativamente, o estado da Paraíba é subdividido nas mesorregiões Agreste Paraibano, Borborema, Mata Paraibana e Sertão Paraibano, segmentadas em 23 microrregiões (AESA, 2022; IBGE, 2023). A área do SHPoEP localiza-se predominantemente na Borborema, com extensões no Agreste e, de forma pontual, no Sertão, evidenciando a diversidade regional do sistema.

No recorte das microrregiões, a área de estudo abrange partes da Serra de Teixeira, Cariri Ocidental e Oriental, Seridó Ocidental e Oriental Paraibano, Curimataú Ocidental e Brejo Paraibano. Essa abrangência confere elevada heterogeneidade fisiográfica, refletida em variações de relevo, solos, uso e cobertura da terra e padrões climáticos, fatores determinantes na geração de escoamento e na dinâmica hídrica do sistema.

Segundo a classificação de Köppen-Geiger, a Paraíba apresenta quatro tipos climáticos principais: BSh, As, Am e Aw (Alvares et al., 2014; Francisco & Santos, 2019). A área de estudo encontra-se predominantemente nos domínios BSh e As, o que reforça sua vulnerabilidade hidrológica e justifica a adoção de abordagens integradas de modelagem e planejamento da gestão hídrica.



Fonte: Autoria própria (2025)

No estado da Paraíba, o clima do tipo As predomina no Litoral e no Agreste, com extensão a áreas do Sertão e Alto Sertão, caracterizando-se por estação seca no verão e chuvas concentradas entre o outono e o inverno. Dados da AESA indicam maior concentração pluviométrica entre janeiro e abril, com contribuição secundária em maio (Silva et al., 2022). Em contraste, o clima BSh ocupa o Planalto da Borborema e parte do Sertão, apresentando altas temperaturas, baixos totais anuais de precipitação (350 a 750 mm) e distribuição irregular das chuvas, configurando a região de menor disponibilidade hídrica do estado (Chaves et al., 2021).

Conforme o Atlas Pluviométrico da Paraíba (2025), as chuvas concentram-se nos sete primeiros meses do ano, enquanto setembro, outubro e novembro constituem o período mais seco. A redução da atuação dos principais sistemas atmosféricos intensifica o déficit hídrico, sobretudo nas áreas semiáridas.

Toda a área analisada insere-se no bioma Caatinga, ecossistema exclusivamente brasileiro, marcado por elevada diversidade fisionômica e florística, resultante da interação entre clima, solos e relevo (Santos, 2023). Apesar de sua singularidade ecológica e relevância social e cultural, a Caatinga apresenta elevado grau de degradação e é o bioma menos protegido do país, o que compromete seus recursos naturais e serviços ecossistêmicos (Freitas et al., 2020; Silva et al., 2020; Jesus et al., 2022).

Entretanto, mesmo diante da implementação de políticas públicas e de ações voltadas à mitigação dos impactos da escassez hídrica, a combinação entre a elevada variabilidade climática do estado e fragilidades nos processos de gestão e governança da água tem potencializado os efeitos de eventos extremos, sobretudo em áreas urbanas. O histórico recorrente de secas no semiárido paraibano evidencia a vulnerabilidade do sistema hídrico regional e a necessidade de estratégias de planejamento mais integradas (Rufino et al., 2021).

A crise hídrica de 2012 a 2017 ilustra esse cenário: em 2017, o açude Epitácio Pessoa atingiu apenas 2,97% de sua capacidade, exigindo medidas severas de racionamento (Meneses et al., 2022). A recuperação parcial ocorreu após a operação do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), um dos maiores empreendimentos de infraestrutura hídrica do país, concebido para transferir água do rio São Francisco para bacias hidrográficas do semiárido nordestino, com o objetivo de garantir segurança hídrica para o abastecimento humano, a dessedentação animal e atividades produtivas. Apesar de sua relevância estratégica para a mitigação dos efeitos das secas prolongadas,

persistem conflitos pelo acesso à água e limitações ao desenvolvimento regional (Ferreira et al., 2020).

3.3.1. Caracterização do território: a escala da bacia hidrográfica

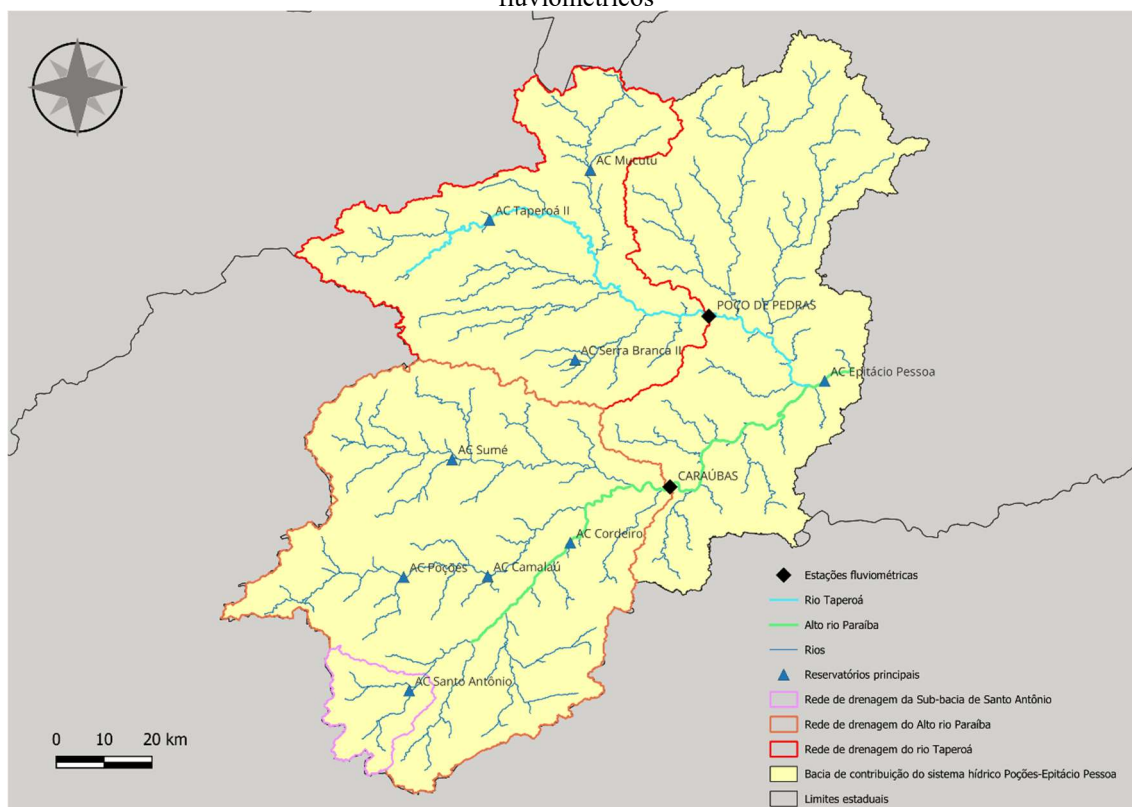
A área de produção hídrica corresponde à bacia de contribuição do SHPoEP, integrante da Bacia do Rio Paraíba, abrangendo o Alto Curso do Rio Paraíba e a sub-bacia do Rio Taperoá (Figura 8), principais setores geradores de escoamento que alimentam o açude Epitácio Pessoa (Meneses et al., 2022).

O Rio Paraíba nasce na Serra do Jabitacá, em Monteiro–PB, e deságua no Oceano Atlântico. Com seus afluentes, desempenha papel estratégico no âmbito do PISF, contribuindo para a recarga do reservatório. A área de drenagem do sistema é estimada em 12.389,14 km² (Alves et al., 2018; Farias & Sousa, 2020).

O Alto Curso do Rio Paraíba ocupa cerca de 6.727,69 km², abrangendo 18 municípios, majoritariamente nas microrregiões do Cariri Ocidental e Oriental, onde as atividades agropecuárias influenciam diretamente a dinâmica hidrológica (Alves et al., 2018; Marcuzzo et al., 2012). A rede de drenagem é composta predominantemente por cursos intermitentes e efêmeros, com escoamento concentrado entre fevereiro e abril. Após a implantação do PISF em 2017, alguns trechos passaram a apresentar regime perenizado (Xavier, 2021).

A sub-bacia do rio Taperoá drena aproximadamente 5.661,45 km² e abrange 26 municípios, destacando-se Juazeirinho, Pocinhos e Taperoá, onde a pressão sobre os recursos hídricos é elevada (Lima et al., 2017). O rio Taperoá, afluente do rio Paraíba, possui regime intermitente e nasce na Serra de Teixeira, atualmente reconhecida como Parque Nacional.

Figura 8 - Bacia do SHPoEP com as sub-bacias trabalhadas no estudo e localização dos postos fluviométricos



Autoria: Adaptado da AESA (2023) e INMET (2023)

Ambas as sub-bacias se inserem no domínio do clima BSh, com longos períodos secos e precipitação média anual em torno de 600 mm (Silva et al., 2020b). A temperatura média mensal é de aproximadamente 26 °C, com elevada insolação e evapotranspiração potencial anual próxima de 1100 mm (De Medeiros et al., 2018). A geologia é dominada por rochas cristalinas pré-cambrianas, e a hidrografia apresenta elevada irregularidade, com desaparecimento da água superficial durante a estação seca (Souza; Suertegaray; Lima, 2009). A vegetação é composta por espécies típicas da Caatinga, adaptadas às condições climáticas adversas (Beuchle et al., 2015).

3.4. CONFIGURAÇÃO E DADOS DE ENTRADA DO MODELO

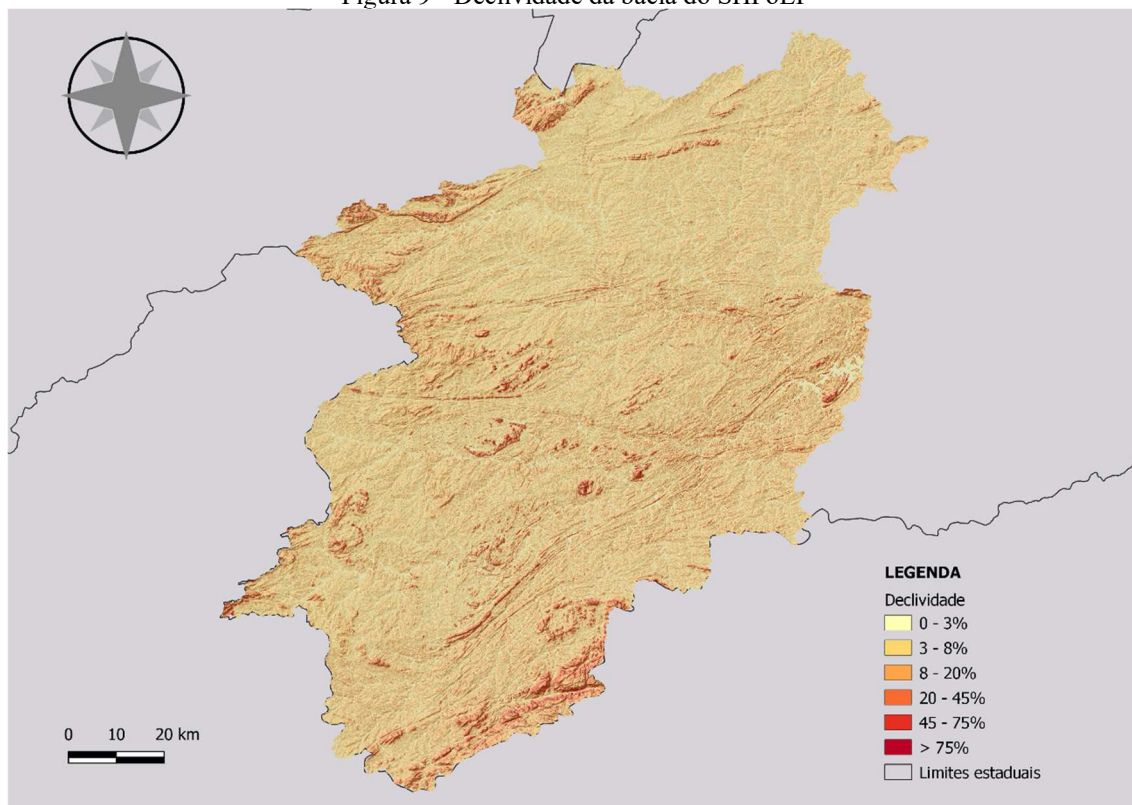
Tendo em vista o objetivo da pesquisa de avaliar a influência do uso e da ocupação do solo sobre a disponibilidade hídrica, optou-se por não realizar a simulação completa da bacia do SHPoEP. Embora a modelagem integral da bacia fosse tecnicamente possível e não afetasse a confiabilidade dos resultados, essa alternativa acarretaria maior complexidade computacional e um aumento expressivo no tempo de processamento, sem benefícios equivalentes para a análise pretendida. Dessa forma, a modelagem concentrou-se nas sub-bacias dos rios Taperoá e Alto Paraíba, adotando como exutórios as estações

fluviométricas de Caraúbas e Poço de Pedras, conforme apresentado na Figura 8. Essas estações foram escolhidas por sua representatividade hidrológica e pela variedade de padrões de uso e cobertura da terra, o que possibilitou a simplificação do modelo e maior eficiência nas simulações, sem prejuízo ao atendimento dos objetivos do estudo.

As simulações hidrológicas foram realizadas por meio da interface QSWAT, ambiente SIG integrado ao SWAT. Ressalta-se que o desempenho do modelo está fortemente condicionado à qualidade e à coerência dos dados de entrada.

Para a modelagem hidrológica no SWAT, foram definidas seis classes de declividade: 0–3%, 3–8%, 8–20%, 20–45%, 45–75% e >75% de acordo com a classificação proposta pela EMBRAPA (Santos et al., 2019), conforme ilustrado na Figura 9. A incorporação dessas classes é fundamental no SWAT, uma vez que a declividade influencia diretamente processos hidrológicos como o escoamento superficial, a infiltração, a erosão do solo e o transporte de sedimentos. As classes de declividade foram integradas aos mapas de solos e de uso e cobertura da terra, atendendo aos requisitos de entrada do modelo e permitindo uma discretização mais adequada das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs). Essa abordagem possibilita uma representação mais fiel da heterogeneidade físico-ambiental da paisagem e melhora a capacidade do modelo em simular a variabilidade espacial dos processos hidrológicos, conforme recomendado por Tanksali e Soraganvi (2020).

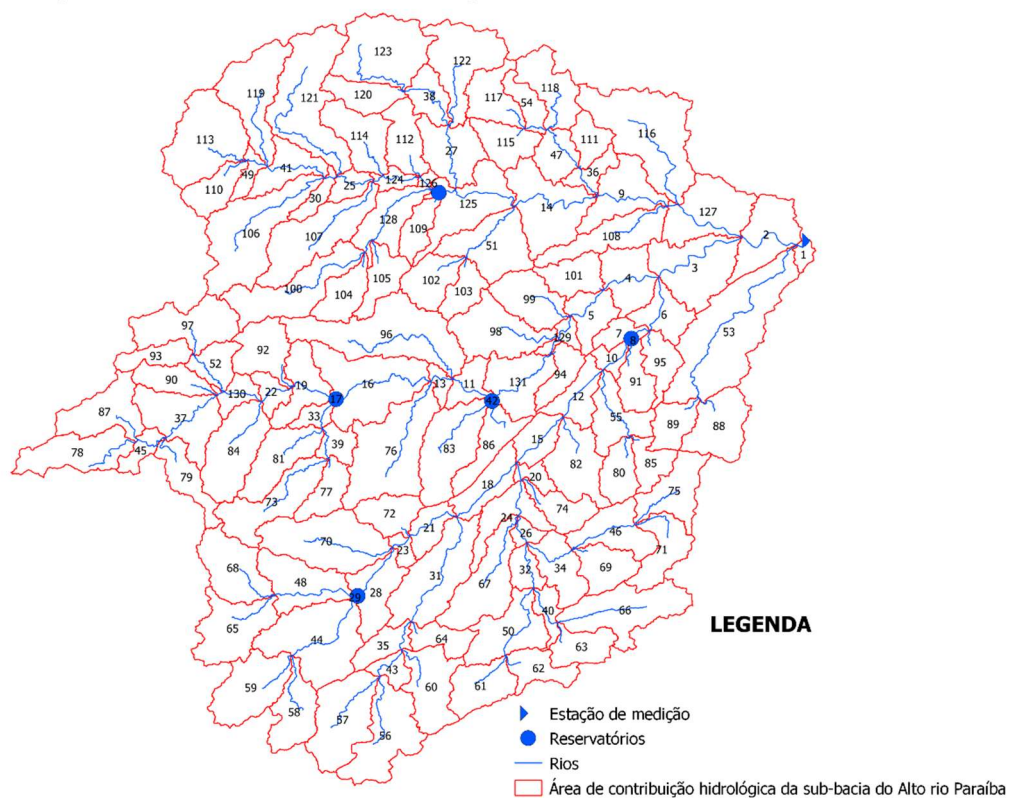
Figura 9 - Declividade da bacia do SHPoEP



Fonte: Adaptado de EMBRAPA (Santos et al., 2019)

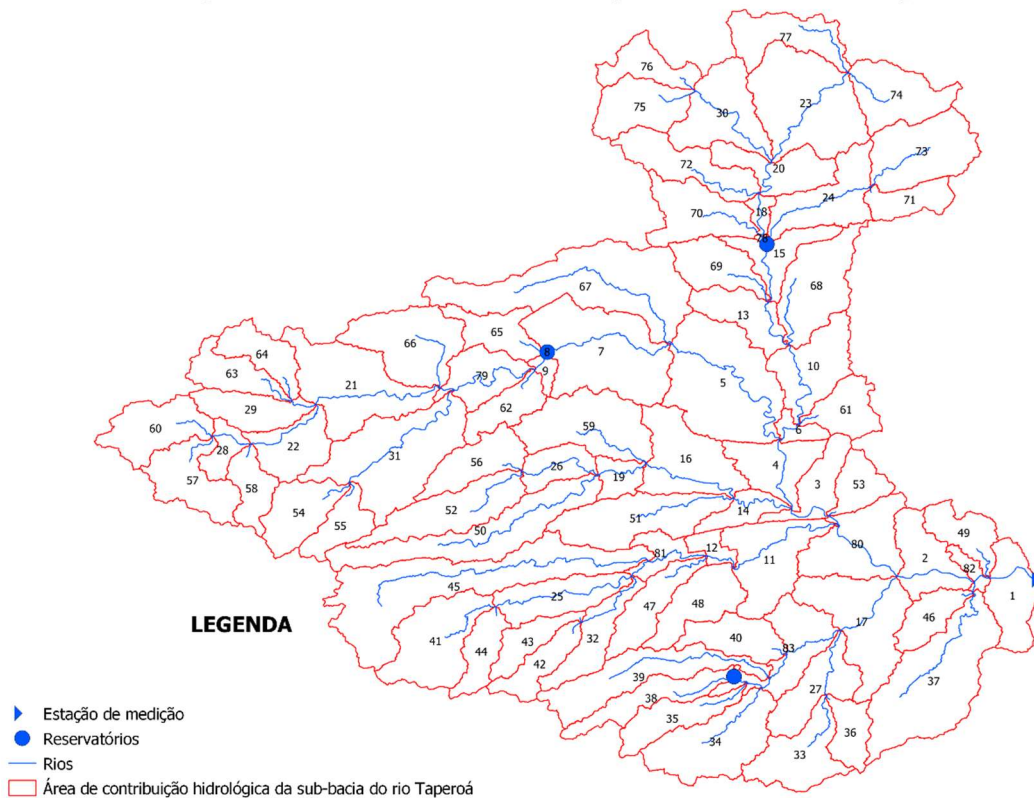
Com essa configuração, foram geradas 132 HRUs para a sub-bacia do Alto rio Paraíba (Figura 10) e 84 para a sub-bacia do rio Taperoá (Figura 11). Destaca-se que o número de HRUs pode variar conforme os objetivos do estudo e o nível de detalhamento desejado. Neste trabalho, unidades espaciais com área inferior a 15% da superfície total da bacia foram agregadas a unidades adjacentes, com o objetivo de reduzir o número de unidades simuladas pelo modelo. Esse procedimento foi adotado para diminuir o tempo de processamento e a complexidade computacional do modelo, além de viabilizar o processo de calibração, sem comprometer a representação espacial dos principais padrões de uso e ocupação do solo.

Figura 10 - Área de contribuição hidrológica da sub-bacia do Alto rio Paraíba



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 11 - Área de contribuição hidrológica da sub-bacia do rio Taperoá



Fonte: Autoria própria (2025)

Adicionalmente, foram incorporados ao modelo apenas os reservatórios mais representativos de cada sub-bacia, conforme apresentado na Tabela 4. A seleção restringiu-se aos reservatórios com capacidade superior a 10 milhões de m³ e com disponibilidade de informações de Cota-Área-Volume (CAV), por serem aqueles com maior influência sobre o regime hidrológico em escala de bacia.

Os pequenos reservatórios não foram explicitamente considerados devido à elevada quantidade dessas estruturas na região, aliada ao seu reduzido volume individual, o que demandaria um esforço excessivo de levantamento, parametrização e inserção no modelo, além de impor limitações computacionais significativas à simulação. Contudo, em termos de balanço hídrico e disponibilidade hídrica em escala de sub-bacia, sua influência tende a ser secundária quando comparada à dos grandes reservatórios, especialmente no contexto das análises anuais e mensais realizadas neste trabalho.

Tabela 4 - Reservatórios inseridos no modelo

Reservatório	Sub-Bacia	Capacidade (m³)
Camalaú	Alto rio Paraíba	46.437.520
Santo Antônio	Alto rio Paraíba	24.424.130
Poções	Alto rio Paraíba	29.861.562
Cordeiro	Alto rio Paraíba	69.965.945
Sumé	Alto rio Paraíba	44.864.100
Taperoá II	Rio Taperoá	14.797.430
Serra Branca II	Rio Taperoá	14.042.568
Mucutu	Rio Taperoá	25.373.341
Total		269.766.596

Fonte: Autoria própria (2025)

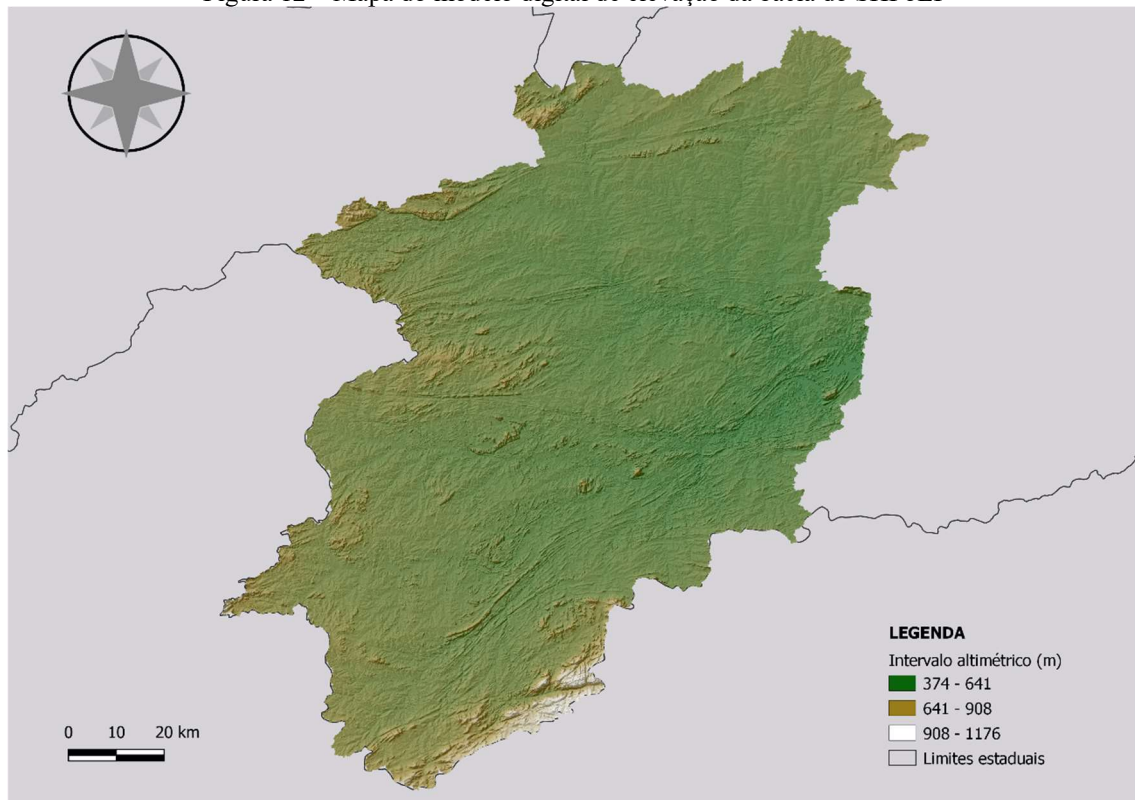
Na sequência, apresentam-se os dados de entrada utilizados na modelagem hidrológica, bem como os procedimentos adotados para sua preparação e integração ao SWAT.

3.4.1. Modelo digital de elevação (MDE)

O MDE empregado (Figura 12) como dado de entrada no SWAT foi obtido a partir do Copernicus DEM, com resolução espacial de 30 × 30 m, por meio do plugin OpenTopography no ambiente QGIS. Antes de sua utilização, o produto foi recortado conforme os limites da bacia do SHPoEP. De acordo com Meadows, Jones e Reinke (2024), os DEMs de melhor desempenho são aqueles derivados das missões mais recentes, destacando-se o TanDEM-X, do qual se origina o Copernicus DEM. De forma complementar, Ghannadi et al. (2023) demonstraram que esse produto apresenta maior acurácia do que o SRTM que é um modelo digital de elevação global produzido pela NASA, amplamente utilizado em estudos hidrológicos e topográficos.

A adoção de um DEM possibilitou uma representação mais fiel das características do relevo, aspecto essencial para a definição correta da rede de drenagem, a delimitação das sub-bacias e a adequada parametrização dos processos hidrológicos no modelo. Esse detalhamento topográfico contribuiu para o aprimoramento da simulação do escoamento superficial, dos processos de infiltração e da dinâmica de transporte de sedimentos na área analisada.

Figura 12 – Mapa do modelo digital de elevação da bacia do SHPoEP



Fonte: Autoria própria (2025)

3.4.2. Uso e cobertura da terra

Os dados de uso e cobertura da terra utilizados neste estudo foram obtidos por meio do MapBiomas, uma iniciativa colaborativa que gera mapas temáticos anuais do território brasileiro a partir de imagens de satélite com resolução espacial de 30 x 30 m, com o objetivo de monitorar alterações ambientais e ocupação do solo (MapBiomas, 2023). Para este trabalho, foram utilizados os Toolkits do MapBiomas disponíveis na plataforma Google Earth Engine (GEE), optando-se pela Coleção 8¹, que disponibiliza mapas temáticos em formato GeoTIFF para todo o Brasil. Esses produtos foram recortados conforme os limites da área de estudo, abrangendo o

¹ A Coleção 8 foi utilizada neste estudo por ser a base dos mapas e cenários de uso e ocupação do solo do projeto SIGMA empregados na pesquisa.

período entre 1994 e 2020, como ilustrado na Figura 13. Adicionalmente, foram coletados os arquivos de legenda e as paletas de cores associadas, garantindo a correta interpretação das classes temáticas.

As informações de uso e cobertura da terra do MapBiomass são derivadas de imagens do satélite Landsat, classificadas em nível de pixel a partir da aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina. Em particular, os mosaicos anuais são gerados por meio do algoritmo Random Forest, implementado no âmbito do próprio projeto MapBiomass. Ressalta-se, contudo, que no presente estudo não foi realizado o desenvolvimento ou o treinamento de modelos de aprendizado de máquina próprios; os algoritmos de ML foram utilizados exclusivamente no processo de geração dos produtos do MapBiomass, sendo estes empregados como dados de entrada na modelagem hidrológica.

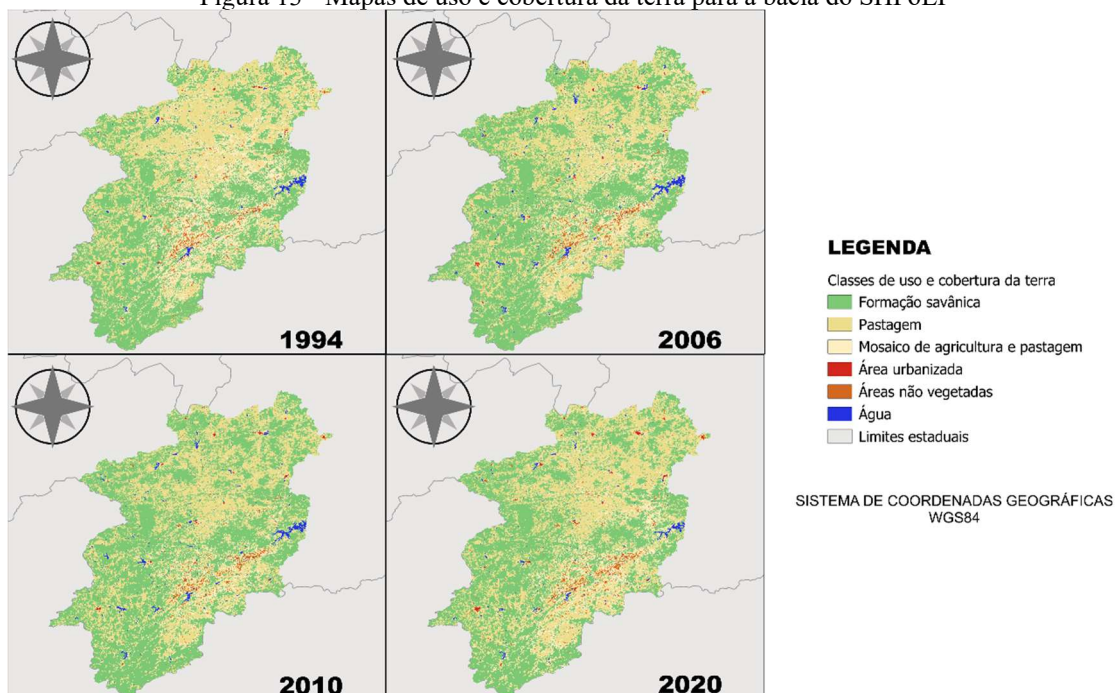
Todo o processamento espacial subsequente foi conduzido no software QGIS, de código aberto, incluindo a reprojeção dos dados para o sistema de referência EPSG:32724 – WGS 84 / UTM zona 24S, garantindo a compatibilidade com os demais insumos utilizados no modelo SWAT. Após o processamento inicial, as classes de uso e cobertura da terra passaram por um procedimento de reclassificação, no qual os valores dos pixels do raster original foram reorganizados com o objetivo de reduzir o número de categorias e adequar a classificação à realidade da bacia estudada. A classificação original do MapBiomass, composta por onze classes, foi consolidada em seis classes finais, de modo a representar de forma mais consistente os principais usos e ocupações do solo na área analisada (Tabela 5) e facilitar sua integração ao modelo SWAT. Como etapa complementar, foi elaborado um arquivo em formato Excel contendo os códigos atribuídos a cada classe, possibilitando sua correta identificação e associação aos códigos internos do modelo (SWAT_CODE).

No que se refere à implementação das mudanças no uso e cobertura da terra nas simulações hidrológicas, os mapas de LULC foram aplicados de forma estática por rodada de simulação, isto é, cada cenário foi representado por um único mapa de uso e cobertura da terra, mantido constante ao longo de toda a série temporal simulada. Dessa forma, não foi adotada uma atualização dinâmica anual do uso do solo dentro de uma mesma simulação. Essa abordagem permite avaliar de forma controlada a sensibilidade do sistema hidrológico a diferentes configurações espaciais de uso da terra, isolando os efeitos estruturais de cada cenário e facilitando a comparação entre condições passadas, atuais e prospectivas.

Tabela 5 - Classificação das categorias de uso e cobertura do solo conforme o MapBiomias		
Classes (Mapbiomas)	Agrupamento de classes	SWAT CODE
Formação florestal		
Formação savânica	Formação savânica	RNGB
Formação campestre		
Pastagem	Pastagem	PAST
Cana		
Mosaico de usos	Mosaico de agricultura e pastagem	AGRR
Outras lavouras temporárias		
Área urbanizada	Área urbanizada	URBN
Outras áreas não vegetadas		
Afloramento rochoso	Áreas não vegetadas	BARR
Rio, lago e oceano	Corpos d'água	WATR

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 13 - Mapas de uso e cobertura da terra para a bacia do SHPoEP



Fonte: Adaptado do Mapbiomas (2023)

3.4.2.1. Simulação de cenários de uso e cobertura da terra

Os cenários de uso e cobertura da terra empregados neste estudo foram obtidos a partir dos produtos do Projeto SIGMA (2024), o qual disponibiliza bases consolidadas para análises ambientais e hidrológicas no estado da Paraíba. Ressalta-se que os cenários prospectivos não foram elaborados no âmbito desta pesquisa, mas utilizados como produtos derivados do estudo desenvolvido por Nascimento (2025).

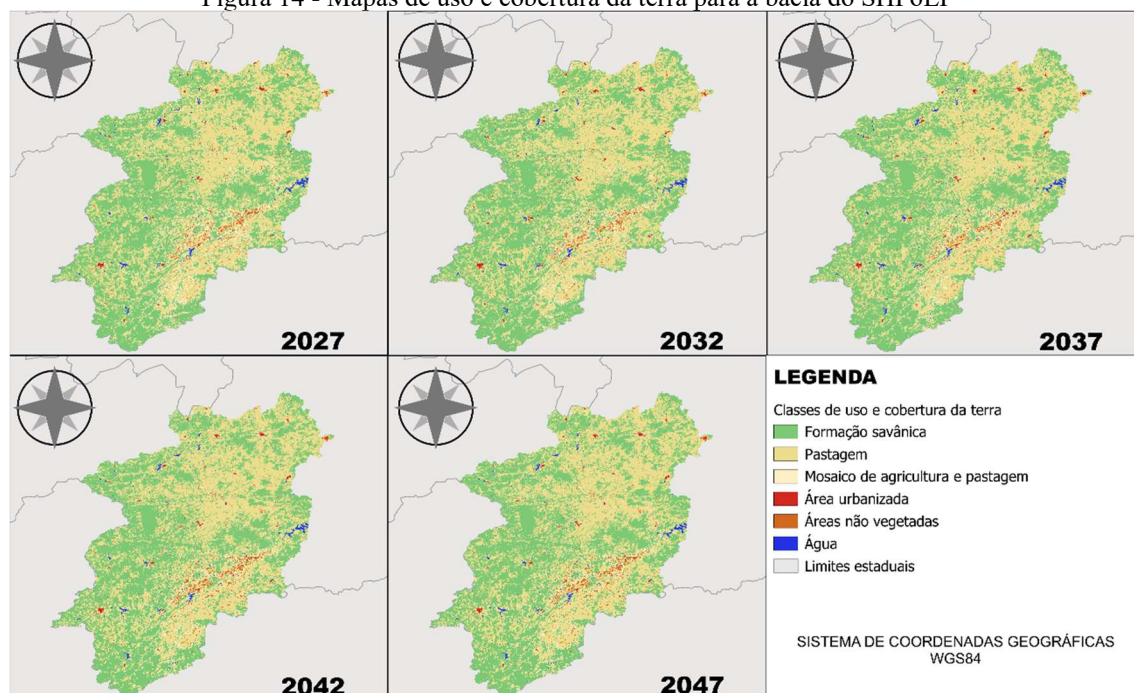
A construção desses cenários, conforme descrito por Nascimento (2025), foi realizada com o auxílio do plugin MOLUSCE (Modules of Land Use Change Evaluation), integrado ao software QGIS, ferramenta amplamente empregada na simulação de mudanças espaço-temporais do uso e cobertura da terra. O procedimento fundamenta-se na identificação de padrões históricos de transição entre classes, permitindo a projeção de cenários futuros de forma estatisticamente consistente (Alam et al., 2021; Brito et al., 2023).

De acordo com Nascimento (2025), adotou-se a regressão logística como técnica de modelagem, em razão de sua ampla aplicação em estudos de dinâmica da paisagem e de sua capacidade de representar padrões espaciais de mudança com desempenho satisfatório em diferentes contextos ambientais (Hu & Lo, 2007). O modelo foi calibrado e validado por meio da comparação entre o mapa observado de uso e cobertura da terra de 2022, proveniente do MapBiomass, e o mapa simulado para o mesmo ano. A avaliação baseou-se em indicadores estatísticos, incluindo acurácia geral, acurácia do produtor e acurácia do usuário, tendo a matriz de erros indicado uma acurácia geral de 84,01%, evidenciando a robustez da simulação (Nascimento, 2025).

A regressão logística permite quantificar a probabilidade de mudança do uso e cobertura da terra em função de um conjunto de variáveis explicativas, tais como acessibilidade (distância às rodovias), declividade, distância às áreas urbanas, distância aos corpos hídricos, proximidade ao canal da transposição do Rio São Francisco, distância aos polos regionais, áreas modificadas após a transposição (2017–2021) e o Índice de Segurança Hídrica do Brasil (ISH). A partir dessas variáveis e do uso atual de cada área, o modelo estima, para cada célula espacial, a probabilidade de ocorrência de alterações no padrão de uso e cobertura da terra.

Após o processo de validação, foram gerados cenários prospectivos com passo temporal de cinco anos, em função de limitações operacionais do MOLUSCE, resultando em projeções para os anos de 2027, 2032, 2037, 2042 e 2047 (Figura 14). Esses mapas foram incorporados às simulações hidrológicas de forma estática, de modo análogo ao adotado para os cenários históricos, isto é, cada cenário prospectivo foi representado por um único mapa de uso e cobertura da terra mantido constante ao longo de toda a simulação. Essa abordagem possibilitou avaliar de forma controlada os efeitos estruturais das diferentes configurações espaciais futuras do uso e cobertura da terra sobre a resposta hidrológica da bacia, isolando o impacto das mudanças espaciais em relação à variabilidade climática interanual.

Figura 14 - Mapas de uso e cobertura da terra para a bacia do SHPoEP



Fonte: Adaptado do Mapbiomas (2023) e SIGMA (2024)

3.4.3. Solo

Os dados de manchas de solo na área da bacia que foram empregados como entrada no modelo SWAT foram obtidos a partir do mapeamento pedológico disponibilizado pela EMBRAPA (Santos et al., 2019), sendo posteriormente recortados de acordo com os limites da Bacia do Sistema Hídrico Poções–Epitácio Pessoa, conforme apresentado na Figura 15. Esse conjunto de informações, possibilitou uma representação mais adequada da distribuição e da variabilidade dos solos na área de estudo.

A incorporação desses dados pedológicos forneceu suporte fundamental à simulação dos principais processos hidrológicos no SWAT, especialmente aqueles relacionados à infiltração, ao armazenamento de água no perfil do solo e à dinâmica de sedimentos e nutrientes. As classes de solo identificadas, bem como seus respectivos códigos adotados no modelo, encontram-se descritas na Tabela 6.

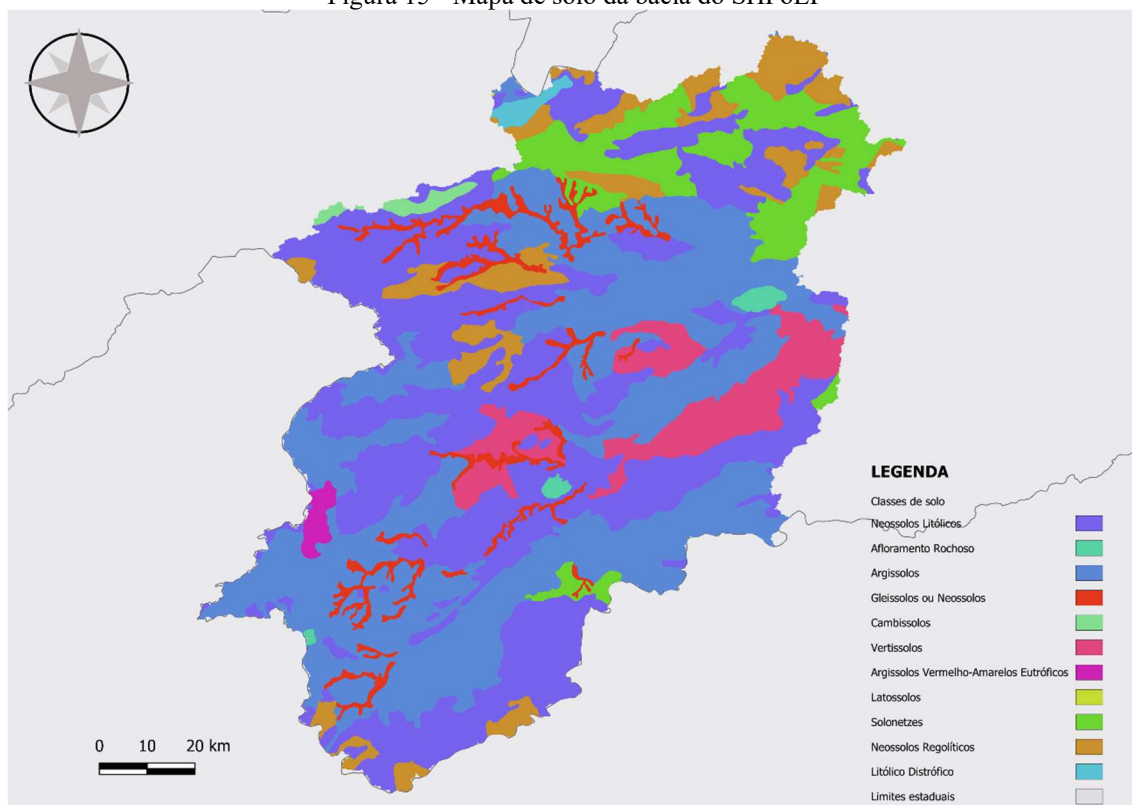
Tabela 6 - Classes de solo presentes na bacia do SHPoEP e o respectivo SWAT code

Solo	SWAT CODE
Neossolos Litólicos	LITO
Afloramento Rochoso	AFR
Argissolos	BNC
Gleissolos ou Neossolos	SALV
Cambissolos	CAMB
Vertissolos	VRT

Solo	SWAT CODE
Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos	PVAE
Latossolos	LATO
Solonetzes	SOLNE
Neossolos Regolíticos	REG
Litólico Distrófico	SLE

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 15 - Mapa de solo da bacia do SHPoEP

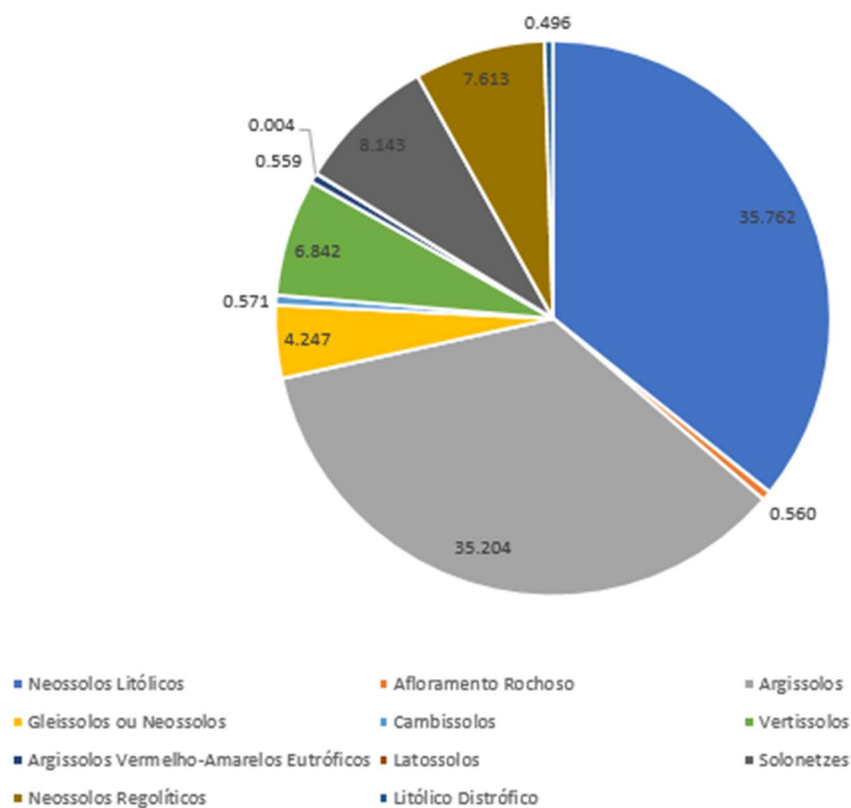


Fonte: Adaptado da EMBRAPA (Santos et al., 2019)

A bacia em estudo apresenta predominância de Neossolos Litólicos e Argissolos, que juntos correspondem a aproximadamente 71% da área total, conforme ilustrado na Figura 16, evidenciando a forte influência de solos rasos e moderadamente desenvolvidos no controle dos processos hidrológicos locais. Os Neossolos Litólicos, que representam cerca de 35,8% da área, caracterizam-se pela pequena profundidade efetiva e elevada proximidade do material de origem, favorecendo respostas hidrológicas rápidas e maior geração de escoamento superficial. Os Argissolos, por sua vez, abrangem aproximadamente 35,2% da bacia e apresentam horizonte subsuperficial texturalmente mais argiloso, o que pode limitar a infiltração vertical e influenciar a redistribuição da água no perfil do solo. Em menor proporção, destacam-se os Solonetzes ($\approx 8,1\%$) e os Neossolos Regolíticos ($\approx 7,6\%$), cujas características físicas e químicas também

contribuem para a heterogeneidade da resposta hidrológica da bacia. Os demais tipos de solo ocorrem de forma pontual, com percentuais individuais inferiores a 7%, reforçando o predomínio de solos pouco evoluídos e estruturalmente restritivos, típicos de ambientes semiáridos.

Figura 16 - Porcentagem de cada tipo de solo da bacia do SHPoEP



Fonte: Autoria própria (2025)

3.4.4. Dados climáticos

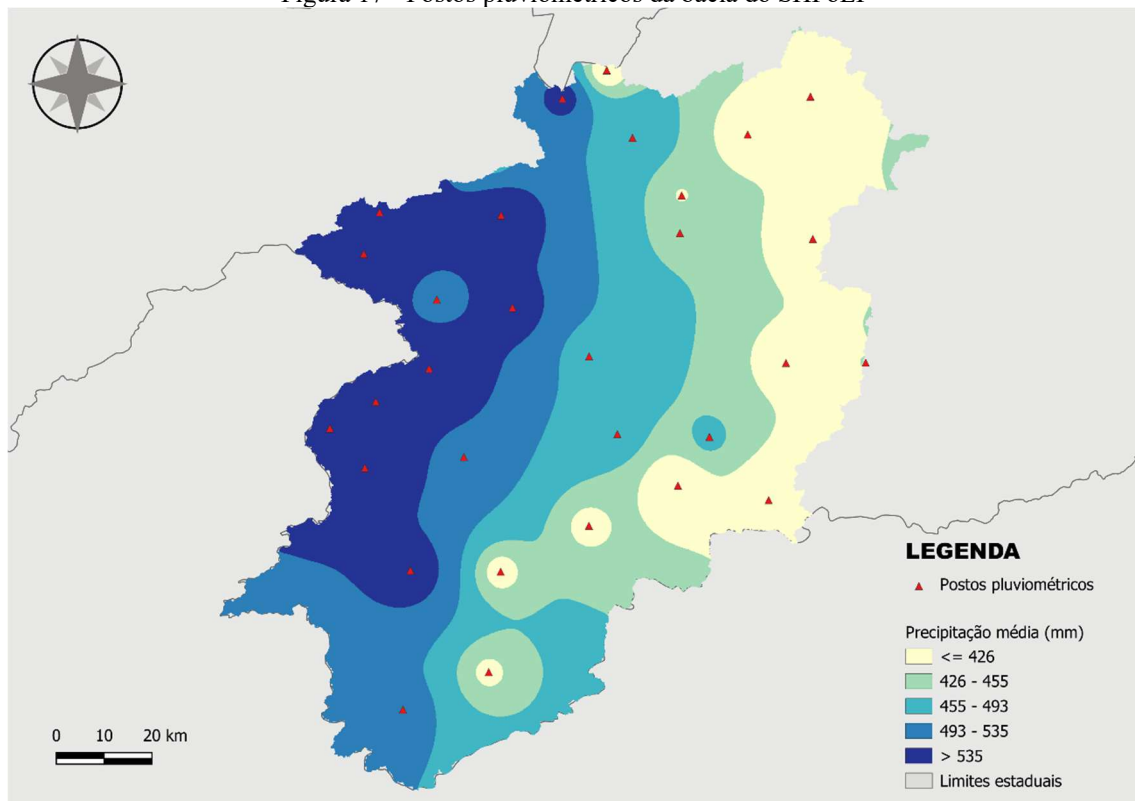
As informações climáticas utilizadas como dados de entrada no modelo SWAT foram obtidas a partir de séries pluviométricas provenientes da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram considerados dados de 32 postos pluviométricos distribuídos no interior e no entorno da área de estudo, de modo a representar adequadamente a variabilidade espacial da precipitação na Bacia do Sistema Hídrico Poções–Epitácio Pessoa. As séries históricas empregadas abrangem o período de 1994 a 2020, garantindo consistência temporal com os mapas históricos de uso e cobertura da terra utilizados na modelagem.

Essas séries pluviométricas foram integradas ao SWAT por meio de sua vinculação espacial às sub-bacias e aos postos pluviométricos definidos no modelo, permitindo uma representação mais realista da variabilidade espaço-temporal da

precipitação. Ressalta-se que a mesma série climática histórica (1994–2020) foi utilizada em todas as simulações hidrológicas, tanto para os cenários históricos quanto para os cenários futuros de uso e cobertura da terra. Dessa forma, não foram elaborados cenários futuros de precipitação, sendo a abordagem adotada voltada ao isolamento do efeito das mudanças espaciais no uso e cobertura da terra sobre a resposta hidrológica da bacia, minimizando a influência da variabilidade climática entre cenários.

A utilização de séries pluviométricas consistentes mostrou-se fundamental para assegurar a confiabilidade das simulações hidrológicas, considerando o papel central da precipitação nos processos de geração de escoamento superficial, recarga hídrica e transporte de sedimentos no SWAT. Adicionalmente, com base nos postos pluviométricos disponíveis, foi realizada uma interpolação da precipitação média anual pelo método *Inverse Distance Weighting* (IDW), com o objetivo de representar espacialmente a distribuição da precipitação média na área de estudo, expressa em milímetros, conforme ilustrado na Figura 17. Destaca-se que essa interpolação foi empregada exclusivamente para fins de visualização e análise exploratória dos dados, não sendo utilizada diretamente como entrada no modelo SWAT.

Figura 17 - Postos pluviométricos da bacia do SHPoEP



Fonte: Adaptado da AESA (2024) e INMET (2024)

3.4.5. Dados hidrológicos

As séries de vazão utilizadas nas etapas de calibração e validação do modelo SWAT foram obtidas a partir do banco de dados hidrométricos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), conforme apresentado na Tabela 7. Esses dados são provenientes de duas estações fluviométricas localizadas na área de estudo, sendo a estação de Caraúbas, situada na sub-bacia do Alto Paraíba, e a estação de Poço de Pedras, inserida na sub-bacia do rio Taperoá.

Após a seleção e organização das séries observadas, os registros de vazão foram utilizados como referência nos procedimentos de calibração e validação do modelo. Esses dados permitiram avaliar o desempenho hidrológico do SWAT na simulação do escoamento nos diferentes compartimentos da bacia, verificando a capacidade do modelo em reproduzir as respostas hidrológicas observadas. Dessa forma, as séries hidrométricas constituíram um elemento fundamental para assegurar a consistência, a robustez e a confiabilidade dos resultados simulados.

Tabela 7 – Identificação das estações fluviométricas na área de estudo

Estação	Tipo	Nome	Latitude	Longitude	Área de drenagem (km²)	Rio
38830000	Fluviométrica	Caraúbas	-7,7211	-36,5052	5030	Paraíba
38850000	Fluviométrica	Poço de pedras	-7,3981	-36,4335	3180	Taperoá

Fonte: Adaptado da ANA (2024)

3.5. SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO

A definição dos parâmetros submetidos ao processo de calibração foi fundamentada em uma revisão bibliográfica sistematizada, realizada para o período de 2015 a 2025, que reuniu 29 estudos aplicados a bacias hidrográficas situadas em regiões semiáridas em diferentes contextos geográficos. Essa análise permitiu reconhecer os parâmetros que apresentam maior sensibilidade e influência no desempenho de modelos hidrológicos em ambientes semiáridos.

Com base nessa avaliação comparativa, foi possível selecionar um conjunto de parâmetros compatível com as particularidades hidrológicas da bacia do Sistema Hídrico Poções–Epitácio Pessoa. Como resultado, organizou-se uma tabela síntese que consolida os parâmetros mais recorrentes na literatura e evidencia aqueles adotados no processo de calibração deste estudo, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Revisão dos parâmetros e respectivas descrições

Parâmetros	Descrição	Quantidade de vezes que os parâmetros foram utilizados	Variável
CN2.mgt*	Número da curva de escoamento SCS inicial para condição de umidade II	29	Streamflow
SOL_AWC.sol*	Capacidade de água disponível no horizonte do solo	25	Streamflow
ALPHA_BF.gw*	A constante de recessão de fluxo de base (dias)	25	Streamflow
ESCO.hru*	Coefficiente de compensação de evaporação do solo	25	Streamflow
GWQMN.gw*	Profundidade limite da água no aquífero raso necessária para que ocorra o fluxo de retorno (mm)	23	Streamflow
GW_DELAY.gw*	Tempo de atraso das águas subterrâneas (dias)	22	Streamflow
GW_REVAP.gw*	Coefficiente de “renovação” das águas subterrâneas	21	Streamflow
CH_K2.rte*	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm/h)	20	Streamflow
SOL_K.sol*	Condutividade hidráulica saturada no horizonte do solo	19	Streamflow
EPCO.bsn*	Cálculo da demanda hídrica pelas plantas	18	Streamflow
RCHRG_DP.gw*	Fração de percolação do aquífero profundo	17	Streamflow
REVAPMN.gw*	Profundidade limite da água no aquífero raso para que ocorra a “revaporação” ou percolação para o aquífero profundo (mm)	16	Streamflow
CH_N2.rte*	Valor “n” de Manning para o canal principal	16	Streamflow
SURLAG.bsn*	Coefficiente de atraso do escoamento superficial (dias)	15	Streamflow
OV_N.hru	Valor n de Manning para o escoamento superficial	12	Streamflow
SOL_BD.sol	Densidade aparente (g. cm ⁻³)	11	Streamflow
SLSUBBSN.hru*	Comprimento médio da encosta (m)	11	Streamflow

Parâmetros	Descrição	Quantidade de vezes que os parâmetros foram utilizados	Variável
SOL_Z.sol	Profundidade da superfície do solo até o fundo da camada	10	<i>Streamflow</i>
CANMX.hru*	Armazenamento máximo do dossel (mm)	7	<i>Streamflow</i>
HRU_SLP.hru	Inclinação média da encosta	5	<i>Streamflow</i>
SHALLST.gw	Profundidade inicial da água no aquífero raso (mm)	5	<i>Streamflow</i>
USLE_P.mgt	Fator P da MUSLE	4	<i>Streamflow</i>
TRNSRCH.bsn	Fração das perdas de transmissão repartidas para o aquífero profundo	4	<i>Streamflow</i>
ALPHA_BNK.rte	Fator alfa do escoamento de base para o armazenamento nas margens (dias)	4	<i>Streamflow</i>
CH_N1.sub	Valor n de Manning para o canal secundário	3	<i>Streamflow</i>
LAT_TTIME.hru	Tempo de viagem do fluxo lateral (dias)	2	<i>Streamflow</i>
CH_K1.sub	Condutividade hidráulica efetiva no canal tributário (mm/h)	2	<i>Streamflow</i>
SOL_ALB.sol	Albedo do solo	2	<i>Streamflow</i>
FFCB.bsn	Armazenamento inicial de água no aquífero raso necessário para que ocorra o fluxo de retorno (mm)	2	<i>Streamflow</i>
MSK_CO1.bsn	Coefficiente de calibração usado para controlar o impacto do tempo de armazenamento	2	<i>Streamflow</i>
SLSOIL.hru	Comprimento da encosta para fluxo subterrâneo lateral (m)	1	<i>Streamflow</i>
GWHT.gw	Altura inicial da água subterrânea (m)	1	<i>Streamflow</i>
RES_ESA.res	Água da superfície do reservatório quando o reservatório está cheio até o vertedouro de emergência	1	<i>Streamflow</i>
RES_EVOL.res	Volume de água necessário para encher o reservatório até o vertedouro de emergência	1	<i>Streamflow</i>

Parâmetros	Descrição	Quantidade de vezes que os parâmetros foram utilizados	Variável
RES_PVOL.res	Volume de água necessário para encher o reservatório até o vertedouro principal	1	Streamflow
RES_PSA.res	Área de superfície do reservatório quando o reservatório está cheio até o vertedouro principal	1	Streamflow
RES_VOL.res	Volume inicial do reservatório	1	Streamflow
RES_RR.res	Taxa média diária de liberação do vertedouro principal	1	Streamflow
EVRSV.res	Coefficiente de evaporação do lago	1	Streamflow
RES_K.res	Condutividade hidráulica do fundo do reservatório	1	Streamflow
SOL_ZMX.sol	Profundidade máxima de enraizamento do perfil do solo	1	Streamflow
DEEPST.gw	Profundidade inicial da água no aquífero profundo (mm)	1	Streamflow
EVRCH.bsn	Fator de ajuste de evaporação de alcance	1	Streamflow
SL.hru	Comprimento médio da encosta	1	Streamflow
SLSOIL.hru	Comprimento da encosta (m)	1	Streamflow

Fonte: Autoria própria (2025)

Autores: (Freire et al., 2025); (Laaboudi et al., 2025); (Hermassi et al., 2025); (Khaleghi; hosseini, 2024); (Hernández-marín et al., 2024); (Mebarki; maref; dris, 2024); (Anandharuban Panchanathan; Haghighi; Mourad Oussalah, 2023); (Fathia Jarray et al., 2023); (Islam et al., 2023); (Wu et al., 2023); (Hordofa et al., 2023); (Dilibaier Aibaidula; Ates; Filiz Dadaser-Celik, 2023); (Sharma; Khare; Choudhary, 2023); (Moazenzadeh; Izady, 2022); (Anouar Hachemaoui et al., 2022); (Sharma; Patel; Sharma, 2022); (Mararakanye; Le Roux; Franke, 2022); (Ben Khelifa et al., 2021); (López-Lambrano et al., 2020); (Zettam et al., 2020); (Nasiri; Ansari; Ziaei, 2020); (Khelifa et al., 2017); (Özcan et al., 2017); (Magalhães et al., 2018); (Gao et al., 2018); (Santos et al., 2018); (Silva ; Cota, 2019); (Zhang et al., 2019); (Mengistu; Van Rensburg; Woyessa, 2019).

Com base na revisão da literatura, foi definido um conjunto de 16 parâmetros (assinalados com * na Tabela 8) a serem submetidos ao processo de calibração do modelo. Esses parâmetros foram selecionados por representarem de forma direta os principais processos hidrológicos, como o escoamento superficial, a infiltração, o armazenamento e a liberação de água no solo, a dinâmica dos aquíferos raso e profundo e a propagação do fluxo na rede de drenagem. No modelo, tais parâmetros podem assumir variação espacial, sendo ajustados por unidades de resposta hidrológica (HRUs), sub-bacias ou trechos de canal, refletindo a heterogeneidade do uso e cobertura da terra, dos tipos de solo e das características fisiográficas da bacia. Por outro lado, alguns parâmetros associados a processos estruturais do sistema hidrológico apresentam valores constantes ou com baixa variabilidade espacial, representando propriedades médias do meio físico. Essa

abordagem permite equilibrar realismo físico e viabilidade computacional, sendo amplamente adotada em estudos hidrológicos em regiões semiáridas, o que confere consistência metodológica à escolha realizada.

Dentre os parâmetros selecionados, destaca-se o CN2, amplamente empregado em estudos hidrológicos (Souza da Silva et al., 2023), por exercer controle significativo sobre a geração do escoamento superficial e apresentar elevada sensibilidade às alterações no uso e na cobertura da terra. Os parâmetros SOL_AWC e SOL_K, por sua vez, estão diretamente associados às propriedades físico-hídricas do solo, regulando a capacidade de retenção de água e a condutividade hidráulica saturada, o que influencia de forma expressiva os fluxos verticais e laterais no perfil do solo.

Os processos relacionados ao escoamento de base e à contribuição do aquífero são representados pelo conjunto de parâmetros ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN, GW_REVAP, RCHRG_DP e REVAPMN, os quais descrevem os mecanismos de recarga, armazenamento e liberação de água subterrânea. Esses processos assumem especial relevância em bacias localizadas em regiões semiáridas, onde a contribuição do fluxo subterrâneo é essencial para a manutenção das vazões durante períodos de estiagem.

Além disso, os parâmetros ESCO, EPCO e CANMX controlam os processos de evaporação, evapotranspiração e interceptação da precipitação pela cobertura vegetal, sendo particularmente importantes em ambientes caracterizados por elevada demanda atmosférica. Já os parâmetros SLSUBBSN e SURLAG estão relacionados à resposta hidrológica das encostas, influenciando o tempo de concentração e o atraso do escoamento superficial. Por fim, os parâmetros CH_K2 e CH_N2 atuam na representação do transporte do fluxo nos canais, ajustando a velocidade de escoamento e os efeitos de atenuação das vazões ao longo da rede de drenagem.

Embora alguns desses parâmetros não estejam entre os mais frequentemente citados na literatura, sua inclusão mostrou-se necessária em função da sensibilidade hidrológica observada e da necessidade de representar adequadamente as condições físicas, geomorfológicas e climáticas da bacia analisada. Dessa forma, o conjunto final de 16 parâmetros adotado equilibra critérios de recorrência bibliográfica, consistência física e capacidade de ajuste do modelo, contribuindo para a redução da equifinalidade e para o aumento da robustez e confiabilidade das simulações hidrológicas realizadas com o SWAT.

CAPÍTULO 4

Neste capítulo será apresentado os resultados referentes à evolução histórica e à previsão de uso e cobertura da terra nas bacias estudadas, com base nos cenários analisados.

4.1. EVOLUÇÃO E PROJEÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA

A análise detalhada da dinâmica espacial do uso e da cobertura da terra revela a presença de padrões bem estabelecidos ao longo do intervalo temporal avaliado, com nítido predomínio das classes relacionadas à formação savânica e às áreas ocupadas por pastagens. Esses resultados estão em consonância com os achados de Leonardo et al. (2021), que destacam a relevância do monitoramento das transformações no uso e na cobertura da terra como subsídio para a compreensão da organização da paisagem e para o planejamento e a gestão integrada dos recursos hídricos. As Tabelas 9 e 10 apresentam a distribuição percentual e a extensão em área das diferentes classes de uso e cobertura do solo na área de estudo.

Tabela 9 - Categorias de uso e cobertura do solo na bacia do SHPoEP e suas respectivas áreas de abrangência ao longo do tempo

Classe	Ano / km ²			
	1994	2020	2027	2047
Formação savânica	5789.353	6050.881	6085.203	6107.946
Pastagem	3950.043	4551.142	5045.915	5347.304
Mosaico de agricultura e pastagem	2378.073	1479.235	980.964	630.236
Área urbanizada	16.108	40.933	44.935	46.525
Áreas não vegetadas	185.922	192.734	165.868	192.320
Água	80.678	85.252	77.296	75.846
Total	12.400,18	12.400,18	12.400,18	12.400,18

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 10 - Porcentagem de cada cenário de uso e cobertura da terra na bacia do SHPoEP

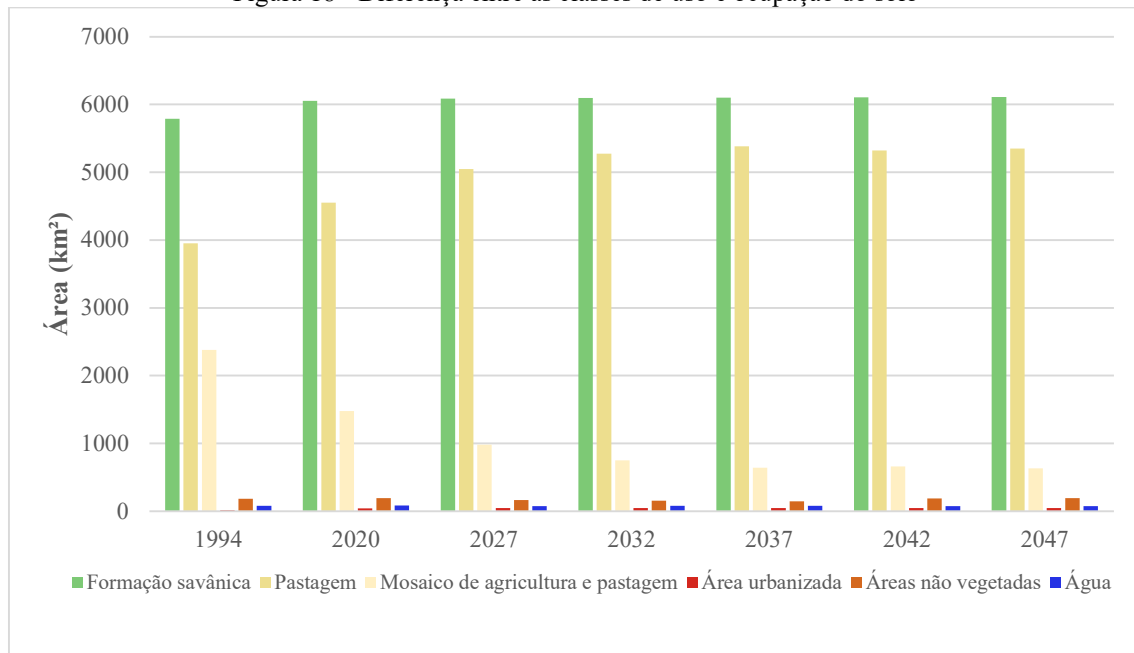
Classe	Ano / %						
	1994	2020	2027	2032	2037	2042	2047
Formação savânica	46.69	48.80	49.07	49.15	49.20	49.23	49.26
Pastagem	31.85	36.70	40.69	42.53	43.40	42.93	43.12
Mosaico de agricultura e pastagem	19.18	11.93	7.91	6.06	5.16	5.32	5.08
Área urbanizada	0.13	0.33	0.36	0.38	0.39	0.37	0.38
Áreas não vegetadas	1.50	1.55	1.34	1.24	1.19	1.54	1.55
Água	0.65	0.69	0.62	0.64	0.65	0.61	0.61
Total	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: Autoria própria (2025)

A avaliação conjunta da dinâmica do uso e cobertura da terra, expressa em valores absolutos (km²) e percentuais (Figura 18), para os períodos observados (1994 e 2020) e projetados (2027–2047), indica que a bacia hidrográfica passou por transformações contínuas e progressivas, sem evidências de alterações bruscas em sua configuração

espacial. No intervalo entre 1994 e 2020, verificou-se a expansão da classe de formação savânica, cuja área aumentou de aproximadamente 5.789 km² (46,69%) para 6.051 km² (48,80%), sugerindo a preservação e leve ampliação da cobertura vegetal nativa. Tal tendência apresenta relevância hidrológica, uma vez que áreas com vegetação natural contribuem para o aumento da infiltração, a conservação do solo e a atenuação do escoamento superficial.

Figura 18 - Diferença entre as classes de uso e ocupação do solo



Fonte: Autoria própria (2025)

No mesmo intervalo temporal, verificou-se uma expansão significativa das áreas de pastagem, que cresceram de 3.950 km² (31,85%) para 4.551 km² (36,70%), concomitantemente à redução expressiva do mosaico de agricultura e pastagem, que diminuiu de 2.378 km² (19,18%) para 1.479 km² (11,93%). Essa transição sugere um processo de simplificação do uso do solo, com substituição de áreas agrícolas diversificadas por sistemas extensivos de pastagem. Apesar dessa mudança estrutural, os resultados da modelagem hidrológica indicaram que tais transformações não resultaram em variações significativas na disponibilidade hídrica da bacia, reforçando a baixa sensibilidade hidrológica às mudanças no uso do solo em escala de bacia.

As classes de área urbanizada e de área não vegetada apresentaram crescimento limitado ao longo do período analisado. A urbanização, embora tenha quase triplicado em termos percentuais entre 1994 e 2020 (de 0,13% para 0,33%), permanece com participação espacial pouco expressiva, inferior a 0,5% da área total da bacia. Dessa forma, sua influência sobre os processos hidrológicos globais, como a vazão média e a

disponibilidade hídrica anual, tende a diminuir. De modo semelhante, as áreas não vegetadas mantiveram-se praticamente estáveis, variando em torno de 1,5% da área total.

No que se refere à classe água, os valores permaneceram relativamente constantes, tanto em km² quanto em porcentagem, com variações inferiores a 0,1% ao longo de todo o período analisado. Essa estabilidade indica que, mesmo diante das mudanças no uso e na cobertura da terra, não houve alterações relevantes na superfície ocupada por corpos hídricos, corroborando os resultados das simulações hidrológicas.

Os cenários futuros simulados (2027–2047) reforçam as tendências observadas no período histórico. A formação savânica atinge aproximadamente 49,26% da área total em 2047, enquanto as pastagens chegam a 43,12%, consolidando o predomínio dessas duas classes. Em contrapartida, o mosaico de agricultura e pastagem apresenta redução gradual, atingindo cerca de 5,08% da área total em 2047. Apesar dessas mudanças projetadas, as simulações indicaram que a disponibilidade hídrica permaneceu relativamente estável, sem variações expressivas nos indicadores hidrológicos analisados.

De forma geral, a integração das análises espaciais com os resultados da modelagem hidrológica permitem concluir que, para a bacia em estudo, as mudanças no uso e ocupação da terra (observadas e simuladas) não exerceram influência significativa sobre a disponibilidade hídrica. Esse comportamento pode ser explicado pela predominância de usos extensivos, pela manutenção de ampla cobertura vegetal natural e pelas características hidroclimáticas do semiárido, onde a disponibilidade hídrica é fortemente condicionada pela variabilidade climática e pela presença e operação de reservatórios, mais do que por alterações graduais no uso do solo.

Assim, os resultados indicam que, embora a dinâmica do uso e cobertura da terra seja um componente essencial para a compreensão ambiental da bacia, o controle da disponibilidade hídrica está mais associado a fatores climáticos e estruturais do sistema hídrico do que às mudanças espaciais observadas, atendendo ao objetivo geral da pesquisa ao demonstrar empiricamente a limitada influência do uso do solo sobre a disponibilidade hídrica no contexto analisado.

CAPÍTULO 5

Neste capítulo, será apresentado os resultados obtidos a partir da calibração e validação do modelo hidrológico, destacando o desempenho do SWAT na simulação das vazões observadas nas bacias estudadas. Serão detalhados os indicadores estatísticos utilizados para avaliar a confiabilidade das simulações, como R^2 , NSE, RSR e PBIAS. Além disso, o capítulo abordará os resultados específicos relacionados à sub-bacia do reservatório Santo Antônio, permitindo a análise da resposta hidrológica em uma escala reduzida e a compreensão dos efeitos das mudanças no uso e ocupação do solo sobre a disponibilidade hídrica nessa área.

5.1. CALIBRAÇÃO

A calibração do modelo SWAT foi realizada de forma semiautomática, utilizando o método SUFI-2, implementado no software SWAT-CUP. O procedimento considerou séries mensais de vazão observadas em duas estações fluviométricas: Caraúbas, localizada no Alto rio Paraíba, e Poço de Pedras, no rio Taperoá.

O período de 1989 a 1993 foi destinado à fase de aquecimento (*warm-up*), necessária para estabilizar as condições iniciais de armazenamento de água no solo, nos reservatórios e nos aquíferos, evitando a influência de estados iniciais arbitrários nas simulações subsequentes. Em seguida, os dados de 1994 a 2004 foram utilizados na etapa de calibração, com 100 iterações para ajustar os parâmetros hidrológicos. Por fim, o intervalo de 2005 a 2012 foi empregado na validação, com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo em períodos independentes e verificar a consistência e a confiabilidade das simulações.

5.1.1. Estação Caraúbas

Os parâmetros considerados no processo de calibração foram ajustados dentro de intervalos previamente definidos, fundamentados em referências da literatura especializada e em aplicações anteriores do modelo em bacias localizadas em regiões semiáridas. A calibração foi realizada utilizando o cenário de uso e cobertura da terra correspondente ao ano de 2020, adotando-se posteriormente os valores calibrados como representativos para os demais cenários simulados, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores calibrados para a estação Caraúbas

Ordem	Parâmetro	Faixa	Valor calibrado	Unidade
1	r__CN2.mgt	-0.0036 – 0.08	0.072058	-
2	v__ALPHA_BF.gw	0.03 – 0.14	0.09215	dias
3	v__GW_DELAY.gw	127.300529 – 278.649445	265.78479	dias
4	v__GWQMN.gw	1250 - 2900	2083.25	mm
5	v__GW_REVAP.gw	0.09 – 0.19	0.1245	-
6	v__ESCO.hru	0.04 – 0.11	0.06695	-
7	v__CANMX.hru	3.4 – 10.4	6.235	mm
8	r__SLSUBBSN.hru	0.4 – 0.9	0.8275	-
9	r__SOL_AWC().sol	0.17 – 0.43	0.4131	-
10	r__SOL_K().sol	-0.2 – 0.46	-0.0581	mm/h
11	v__CH_K2.rte	0 - 78	9.75	mm/h
12	v__RCHRG_DP.gw	0.03 – 0.21	0.2001	-
13	v__CH_N2.rte	-0.01 – 0.03	0.0226	-

Ordem	Parâmetro	Faixa	Valor calibrado	Unidade
14	v__EPCO.bsn	0.402742 - 1	0.847699	-
15	v__REVAPMN.gw	0 - 500	337.5	mm
16	v__SURLAG.bsn	0 - 24	5.64	dias

Fonte: Autoria própria (2025)

Adicionalmente, a Tabela 12 apresenta os valores dos parâmetros calibrados para os cenários utilizados.

Tabela 12 - Valores calibrados para a estação Caraúbas para cenários passados e futuros							
Parâmetros	1994	2020	2027	2032	2037	2042	2047
r__CN2.mgt	0.072058	0.072058	0.072058	0.072058	0.072058	0.072058	0.072058
v__ALPHA_BF.gw	0.09215	0.09215	0.09215	0.09215	0.09215	0.09215	0.09215
v__GW_DELAY.gw	265.78479	265.78479	265.78479	265.78479	265.78479	265.78479	265.78479
v__GWQMN.gw	2083.25	2083.25	2083.25	2083.25	2083.25	2083.25	2083.25
v__GW_REVAP.gw	0.1245	0.1245	0.1245	0.1245	0.1245	0.1245	0.1245
v__ESCO.hru	0.06695	0.06695	0.06695	0.06695	0.06695	0.06695	0.06695
v__CANMX.hru	6.235	6.235	6.235	6.235	6.235	6.235	6.235
r__SLSUBBSN.hru	0.8275	0.8275	0.8275	0.8275	0.8275	0.8275	0.8275
r__SOL_AWC().sol	0.4131	0.4131	0.4131	0.4131	0.4131	0.4131	0.4131
r__SOL_K().sol	-0.0581	-0.0581	-0.0581	-0.0581	-0.0581	-0.0581	-0.0581
v__CH_K2.rte	9.75	9.75	9.75	9.75	9.75	9.75	9.75
v__RCHRG_DP.gw	0.2001	0.2001	0.2001	0.2001	0.2001	0.2001	0.2001
v__CH_N2.rte	0.0226	0.0226	0.0226	0.0226	0.0226	0.0226	0.0226
v__EPCO.bsn	0.847699	0.847699	0.847699	0.847699	0.847699	0.847699	0.847699
v__REVAPMN.gw	337.5	337.5	337.5	337.5	337.5	337.5	337.5
v__SURLAG.bsn	5.64	5.64	5.64	5.64	5.64	5.64	5.64

Fonte: Autoria própria (2025)

O desempenho da calibração na estação de Caraúbas foi classificado como muito bom, com valores de R^2 entre 0,88 e 0,90 e de NSE entre 0,88 e 0,90, indicando elevada capacidade do modelo de reproduzir as vazões observadas. Os valores de RSR, entre 0,32 e 0,35, reforçam a baixa magnitude dos erros de simulação, enquanto o PBIAS apresentou valores predominantemente satisfatórios, com leve tendência à superestimação das vazões (Tabela 13). De modo geral, o conjunto dos indicadores estatísticos evidencia a consistência do ajuste obtido e a adequação do modelo para a representação dos processos hidrológicos dominantes na sub-bacia.

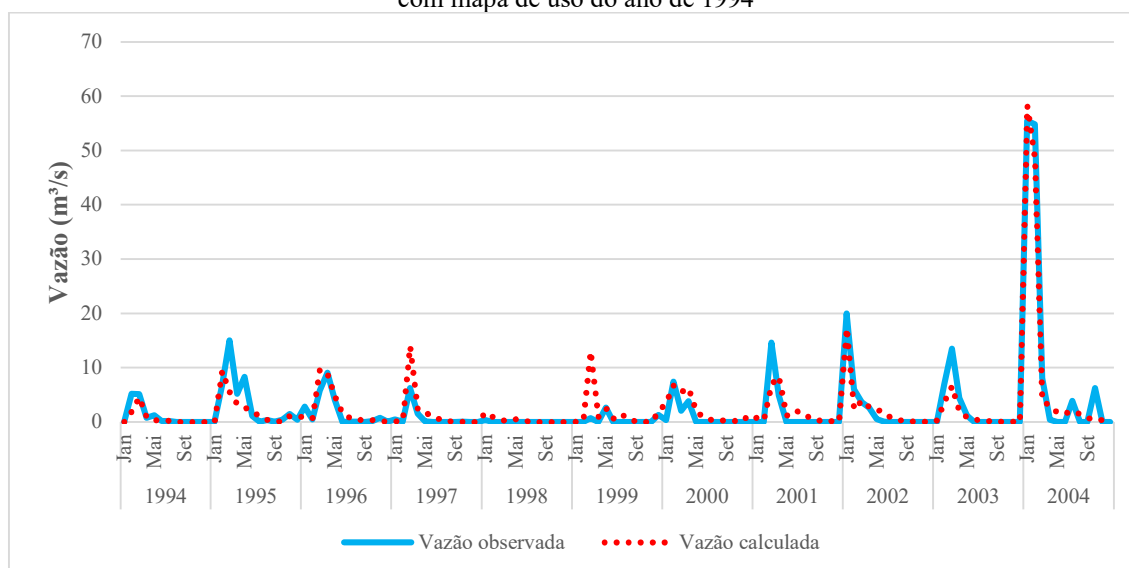
Tabela 13 - Resultado da calibração para a estação Caraúbas

Estação / Cenário	R ²	NSE	PBIAS (%)	RSR
Caraúbas / 1994	0,90 (Muito bom)	0,90 (Muito bom)	-6,1 (Muito bom)	0,32 (Muito bom)
Caraúbas / 2020	0,89 (Muito bom)	0,88 (Muito bom)	-19,1 (Satisfatório)	0,34 (Muito bom)
Caraúbas / 2027	0,88 (Muito bom)	0,88 (Muito bom)	-18,5 (Satisfatório)	0,35 (Muito bom)
Caraúbas / 2032	0,89 (Muito bom)	0,88 (Muito bom)	-15,6 (Satisfatório)	0,34 (Muito bom)
Caraúbas / 2037	0,89 (Muito bom)	0,88 (Muito bom)	-14,1 (Bom)	0,34 (Muito bom)
Caraúbas / 2042	0,89 (Muito bom)	0,88 (Muito bom)	-15,8 (Satisfatório)	0,34 (Muito bom)
Caraúbas / 2047	0,89 (Muito bom)	0,88 (Muito bom)	-15,2 (Satisfatório)	0,34 (Muito bom)

Fonte: Autoria própria (2025)

O hidrograma referente à calibração dos parâmetros para a sub-bacia do Alto rio Paraíba, estação Caraúbas para o ano de 1994 reforça o bom desempenho do modelo SWAT na representação do regime hidrológico da bacia. Observa-se que as vazões simuladas acompanham de forma consistente a variabilidade temporal das vazões observadas, sobretudo na identificação dos períodos de estiagem e dos eventos de maior magnitude associados a chuvas concentradas. Durante a calibração, há boa correspondência entre os picos de vazão e as fases de recessão, evidenciando que os parâmetros ajustados representaram adequadamente os processos de escoamento superficial e a contribuição do fluxo de base, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 1994



Fonte: Autoria própria (2025)

5.1.2. Estação Poço de Pedras

A calibração dos parâmetros do modelo para a estação Poço de Pedras foi realizada a partir do ajuste de variáveis relacionadas aos processos de escoamento superficial, armazenamento e retenção de água no solo, recarga dos aquíferos e contribuição do escoamento de base. O procedimento de calibração utilizou o cenário de uso e cobertura da terra referente ao ano de 2020, adotando-se os valores calibrados como representativos para os cenários futuros simulados, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores calibrados para a estação Poço de Pedras

Ordem	Parâmetro	Faixa	Valor calibrado	Unidade
1	r_CN2.mgt	-0.00618 – 0	-0.002256	-
2	v_ALPHA_BF.gw	0.155433 – 0.190729	0.179611	dias
3	v_GW_DELAY.gw	245.230698 – 283.937958	252.004471	dias
4	v_GWQMN.gw	3000 - 4500	3457.5	mm
5	v_GW_REVAP.gw	0.072007 – 0.094495	0.074818	-
6	v_ESCO.hru	0.12 – 0.3	0.2091	-
7	v_CANMX.hru	6 – 10	6.38	mm
8	r_SLSUBBSN.hru	-0.454606 – -0.241218	-0.447137	-
9	r_SOL_AWC().sol	0.22 – 0.35	0.26485	-
10	r_SOL_K().sol	-0.05 – 0.2	0.02875	mm/h
11	v_CH_K2.rte	35 - 80	37.025002	mm/h
12	v_RCHRG_DP.gw	0 – 0.12	0.0162	-
13	v_CH_N2.rte	-0.01 – 0.3	0.01945	-
14	v_EPCO.bsn	-0.43333 – 0.287645	0.272751	-
15	v_REVAPMN.gw	0 - 500	292.5	mm
16	v_SURLAG.bsn	8 - 18	14.45	dias

Fonte: Autoria própria (2025)

Adicionalmente, a Tabela 15 apresenta os valores dos parâmetros calibrados para os cenários utilizados.

Tabela 15 - Valores calibrados para a estação Poço de Pedras para cenários passados e futuros

Parâmetros	1994	2020	2027	2032	2037	2042	2047
r_CN2.mgt	-0.002256	-0.002256	-0.002256	-0.002256	-0.002256	-0.002256	-0.002256
v_ALPHA_BF.gw	0.179611	0.179611	0.179611	0.179611	0.179611	0.179611	0.179611
v_GW_DELAY.gw	252.004471	252.004471	252.004471	252.004471	252.004471	252.004471	252.004471
v_GWQMN.gw	3457.5	3457.5	3457.5	3457.5	3457.5	3457.5	3457.5
v_GW_REVAP.gw	0.074818	0.074818	0.074818	0.074818	0.074818	0.074818	0.074818
v_ESCO.hru	0.2091	0.2091	0.2091	0.2091	0.2091	0.2091	0.2091
v_CANMX.hru	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38

Parâmetros	1994	2020	2027	2032	2037	2042	2047
r_SLSUBBSN.hru	-0.447137	-0.447137	-0.447137	-0.447137	-0.447137	-0.447137	-0.447137
r_SOL_AWC().sol	0.26485	0.26485	0.26485	0.26485	0.26485	0.26485	0.26485
r_SOL_K().sol	0.02875	0.02875	0.02875	0.02875	0.02875	0.02875	0.02875
v_CH_K2.rte	37.025002	37.025002	37.025002	37.025002	37.025002	37.025002	37.025002
v_RCHRG_DP.gw	0.0162	0.0162	0.0162	0.0162	0.0162	0.0162	0.0162
v_CH_N2.rte	0.01945	0.01945	0.01945	0.01945	0.01945	0.01945	0.01945
v_EPCO.bsn	0.272751	0.272751	0.272751	0.272751	0.272751	0.272751	0.272751
v_REVAPMN.gw	292.5	292.5	292.5	292.5	292.5	292.5	292.5
v_SURLAG.bsn	14.45	14.45	14.45	14.45	14.45	14.45	14.45

Fonte: Autoria própria (2025)

O desempenho estatístico da calibração (Tabela 16) foi classificado como de bom a muito bom, com valores de R^2 entre 0,82 e 0,83 e de NSE entre 0,72 e 0,79, evidenciando a adequada capacidade do modelo de reproduzir a dinâmica das vazões. Os valores de RSR, situados entre 0,46 e 0,53, confirmam a boa qualidade das simulações, enquanto o PBIAS apresentou predominância de valores muito bons a satisfatórios.

Tabela 16 - Resultado da calibração para a estação Poço de Pedras

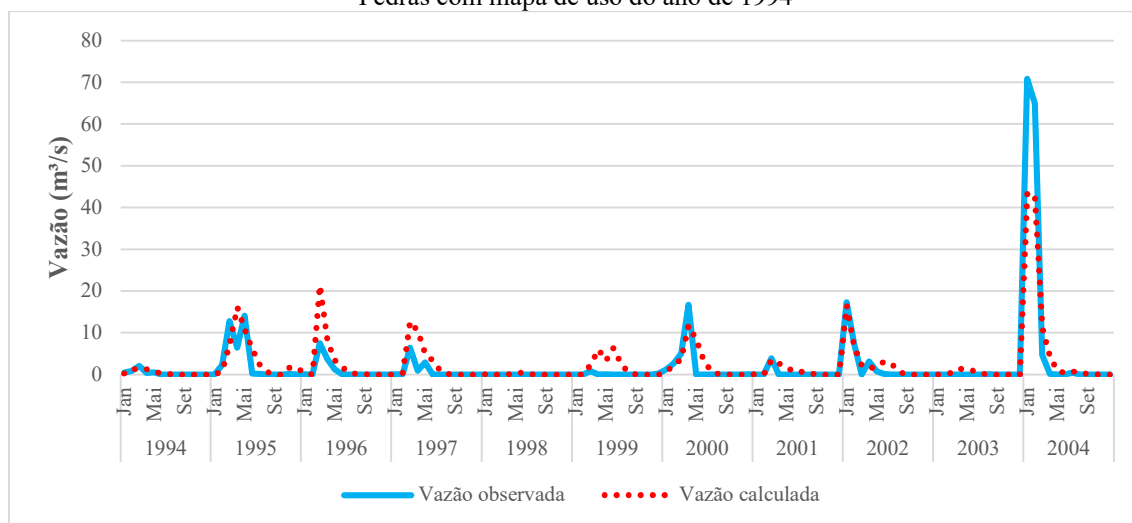
Estação / Cenário	R^2	NSE	PBIAS (%)	RSR
Poço de Pedras / 1994	0,83 (Muito bom)	0,79 (Muito bom)	-24,8 (Satisfatório)	0,46 (Muito bom)
Poço de Pedras / 2020	0,83 (Muito bom)	0,75 (Muito bom)	-9,3 (Muito bom)	0,50 (Muito bom)
Poço de Pedras / 2027	0,82 (Muito bom)	0,73 (Bom)	-5,9 (Muito bom)	0,52 (Bom)
Poço de Pedras / 2032	0,82 (Muito bom)	0,73 (Bom)	-4,2 (Muito bom)	0,52 (Bom)
Poço de Pedras / 2037	0,82 (Muito bom)	0,72 (Bom)	-3,5 (Muito bom)	0,52 (Bom)
Poço de Pedras / 2042	0,82 (Muito bom)	0,72 (Bom)	-3,3 (Muito bom)	0,52 (Bom)
Poço de Pedras / 2047	0,82 (Muito bom)	0,72 (Bom)	-3,1 (Muito bom)	0,53 (Bom)

Fonte: Autoria própria (2025)

O hidrograma de calibração da estação Poço de Pedras, referente às simulações utilizando o mapa de uso do solo do ano de 1994, corroboram o bom desempenho do modelo na representação da dinâmica hidrológica da sub-bacia. De maneira geral, observa-se que as vazões simuladas acompanham satisfatoriamente a evolução temporal das vazões observadas, especialmente na identificação dos períodos de estiagem prolongada e na resposta aos eventos chuvosos mais intensos. Durante a calibração, o modelo apresentou boa capacidade de ajuste tanto às vazões de base quanto aos picos de cheia, ainda que sejam observadas discrepâncias pontuais nos valores máximos,

comportamento típico de bacias semiáridas com regime hidrológico fortemente intermitente, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 1994



Fonte: Autoria própria (2025)

5.1.3. Sub-bacia do reservatório Santo Antônio

Após a realização das simulações hidrológicas considerando os diferentes cenários de uso e cobertura da terra nas sub-bacias do Alto rio Paraíba, estação Caraúbas e rio Taperoá, estação Poço de Pedras, observou-se que as variações espaciais e temporais do uso do solo não promoveram mudanças expressivas na disponibilidade hídrica simulada. Assumiu-se, portanto, uma premissa de baixa sensibilidade do modelo às alterações de LULC devido, principalmente, à escala de análise ou mesmo devido à existência da cadeia de reservatórios que retém o volume gerado até o seu limite de extravasamento, a partir do qual o fluxo seguirá para a calha do rio e para o próximo reservatório.

Partindo dessa premissa, este estudo optou por aprofundar a análise, em uma escala diferente, visando verificar se a sensibilidade do modelo SWAT às alterações no uso e cobertura da terra poderia ser mais evidenciada em uma unidade espacial de menor dimensão, e portanto, de maior escala, e sem a influência de reservatórios internos a bacia, caracterizando assim uma maior influência antrópica direta.

Nesse contexto, foi selecionada uma sub-bacia inserida na bacia do Alto rio Paraíba (Figura 21), que abriga exclusivamente o reservatório de Santo Antônio. Esse sistema hidrológico é mais simplificado e composto por apenas 8 *Hydrologic Response Units* (HRUs). A presença de um número reduzido de HRUs indica menor

heterogeneidade espacial, o que contribui para a simplificação da parametrização, redução da complexidade computacional e maior controle do processo de calibração. Dessa forma, a delimitação dessa sub-bacia possibilitou a avaliação do desempenho do modelo em um ambiente hidrológicamente mais controlado, fortemente condicionado pela presença de uma única estrutura de acumulação hídrica.

Figura 21 - Área de contribuição hidrológica do reservatório Santo Antônio



Fonte: Autoria própria (2025)

Os efeitos compensatórios, podem ser observados em cenários gerados por métodos de Inteligência Artificial, como os utilizados pelo plugin Molusce/QGIS, onde uma classe de uso do solo muda para uma outra classe e as áreas destas são compensadas no que concerne ao dado quantitativo numa análise holística da bacia. Neste sentido, o modelo hidrológico pode não perceber variações na vazão, uma vez que as áreas das classes de LULC se “compensam” entre si.

Os valores dos parâmetros utilizados no modelo da sub-bacia do reservatório Santo Antônio vieram do processo de calibração efetuado para a bacia de contribuição da estação Caraúbas (ver os valores calibrados da Tabela 11), considerando especificamente os conjuntos de parâmetros representativos dos anos de 1994 e 2020. Essa opção metodológica fundamenta-se no princípio da similaridade hidrológica, uma vez que ambas as áreas compartilham condições climáticas, fisiográficas e hidrogeológicas

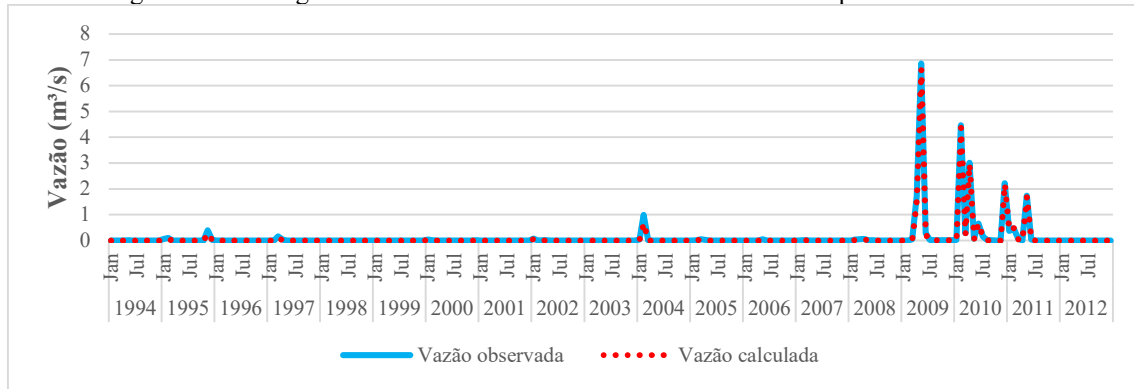
semelhantes, o que justifica a aplicação dos mesmos parâmetros em diferentes escalas espaciais.

Adicionalmente, devido à inexistência de séries históricas de vazão observada para a sub-bacia de Santo Antônio, os valores de vazão simulados durante a calibração da bacia de Caraúbas foram utilizados como referência, assumindo o papel de vazão observada para fins comparativos. Essa abordagem permitiu analisar a coerência da resposta hidrológica do modelo quando aplicado a uma sub-bacia de menor porte (transferência de parâmetros), bem como avaliar a consistência do comportamento simulado sob a utilização de um mesmo conjunto de parâmetros.

Os resultados obtidos com esse experimento em escala reduzida possibilitam uma discussão mais aprofundada sobre a influência da escala espacial na sensibilidade do modelo SWAT às mudanças no uso e na cobertura da terra. Além disso, contribuem para a compreensão das potencialidades e limitações da modelagem hidrológica em ambientes semiáridos. Dessa forma, essa análise complementar reforça a robustez da metodologia adotada e fornece suporte adicional à interpretação dos resultados previamente obtidos para as sub-bacias do Alto rio Paraíba, estação Caraúbas e rio Taperoá, estação Poço de Pedras.

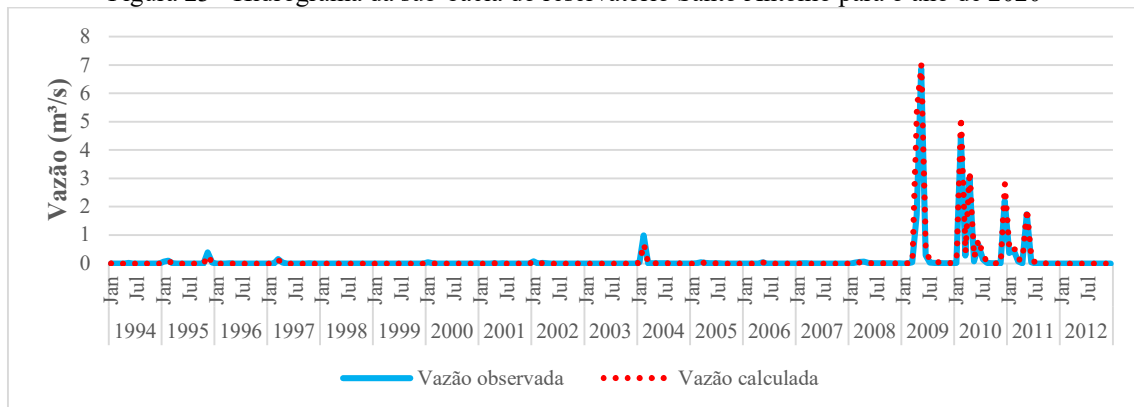
O hidrograma gerado para a sub-bacia do reservatório de Santo Antônio apresentou desempenho satisfatório, conforme ilustrado nas Figura 22 e 23, a partir da aplicação dos parâmetros previamente calibrados para sub-bacias do Alto rio Paraíba, estação Caraúbas. Observa-se uma boa concordância entre as vazões simuladas e aquelas adotadas como observadas no período de 1994 a 2012, evidenciando a capacidade do modelo em reproduzir adequadamente o comportamento especialmente hidrológico em uma escala espacial de microbacia. O resultado também aponta para a utilização do processo de transferência de parâmetros dentro desta bacia, para seções onde não existem dados medidos de vazão.

Figura 22 - Hidrograma da sub-bacia do reservatório Santo Antônio para o ano de 1994



Fonte: Autoria própria (2025)

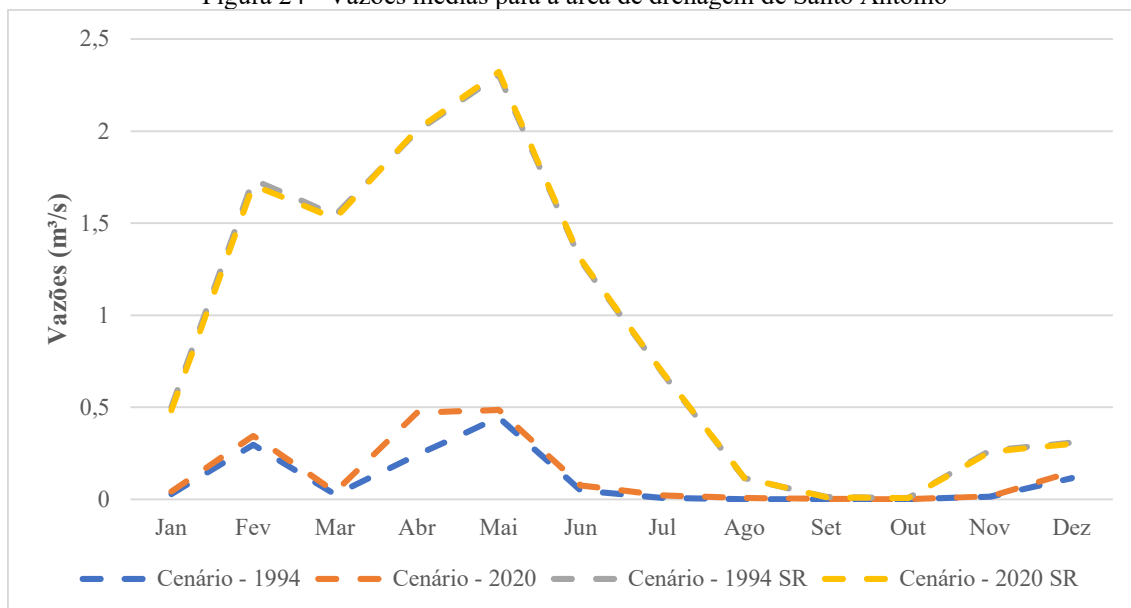
Figura 23 - Hidrograma da sub-bacia do reservatório Santo Antônio para o ano de 2020



Fonte: Autoria própria (2025)

A análise comparativa das vazões médias mensais simuladas para os cenários de uso e cobertura da terra de 1994 e 2020, considerando as condições com e sem a presença de reservatórios (SR) (Figura 24), evidencia um incremento consistente das vazões ao longo de todos os meses do ano no cenário mais recente. Observa-se, adicionalmente, que o cenário sem reservatórios e sem os valores calibrados apresentou valores de vazão média superiores àqueles obtidos no cenário com reservatórios e com valores calibrados, refletindo o efeito regulador dessas estruturas sobre o escoamento. O aumento mais expressivo das vazões ocorre no período de janeiro a maio, que corresponde à estação chuvosa da bacia, no qual se verificou um acréscimo acumulado de aproximadamente 33% na vazão média simulada em 2020 em comparação ao cenário de 1994 com a presença de reservatório.

Figura 24 - Vazões médias para a área de drenagem de Santo Antônio



Fonte: Autoria própria (2025)

5.2. VALIDAÇÃO

5.2.1. Estação Caraúbas

A validação do modelo hidrológico para a estação Caraúbas apresentou desempenho consistente e satisfatório em todos os cenários analisados (Tabela 17). Os coeficientes de determinação (R^2) variaram entre 0,81 e 0,82, indicando uma elevada capacidade do modelo de reproduzir a variabilidade observada das vazões. De forma semelhante, os valores do coeficiente de eficiência de Nash–Sutcliffe (NSE), situados entre 0,80 e 0,81, classificam o ajuste como muito bom, reforçando a robustez do modelo na representação dos processos hidrológicos da bacia.

O índice RSR manteve-se praticamente constante, com valores em torno de 0,43–0,44, classificado como muito bom em todos os cenários, o que evidencia baixos erros residuais normalizados. Em relação ao PBIAS, observou-se variação entre 1,4% e 25,2%, com desempenho predominantemente satisfatório, embora o cenário de 2032 tenha classificada como insatisfatória. Ainda assim, o conjunto de indicadores indica que o modelo apresentou desempenho adequado na simulação das vazões na estação Caraúbas.

Tabela 17 - Validação para a estação Caraúbas

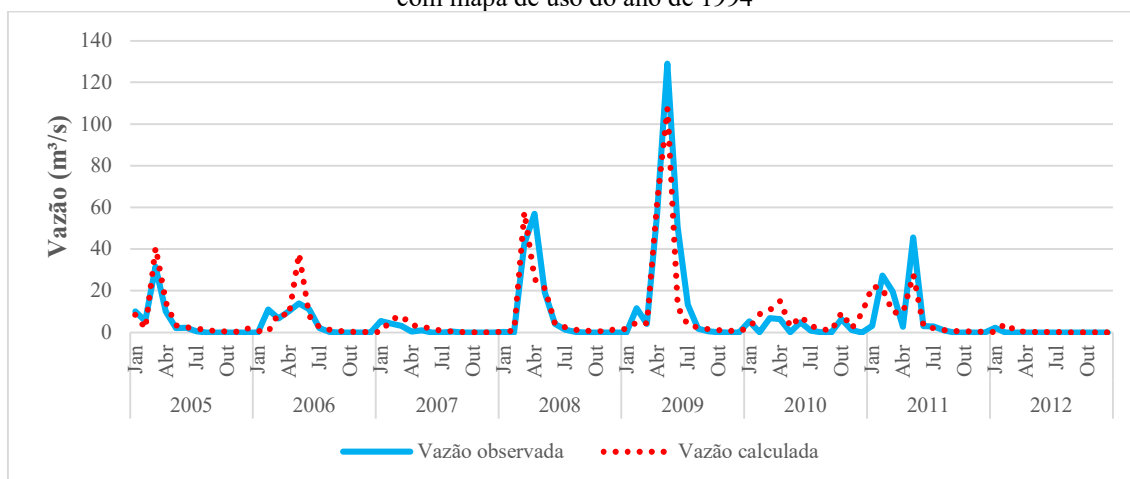
Estação / Cenário	R^2	NSE	PBIAS (%)	RSR
Caraúbas / 1994	0,81 (Muito bom)	0,81 (Muito bom)	1,4 (Muito bom)	0,43 (Muito bom)
Caraúbas / 2020	0,82 (Muito bom)	0,81 (Muito bom)	19,2 (Satisfatório)	0,43 (Muito bom)
Caraúbas / 2027	0,82 (Muito bom)	0,81 (Muito bom)	18,6 (Satisfatório)	0,43 (Muito bom)

Estação / Cenário	R ²	NSE	PBIAS (%)	RSR
Caraúbas / 2032	0,81 (Muito bom)	0,80 (Muito bom)	25,2 (Insatisfatório)	0,44 (Muito bom)
Caraúbas / 2037	0,82 (Muito bom)	0,81 (Muito bom)	16,5 (Satisfatório)	0,43 (Muito bom)
Caraúbas / 2042	0,82 (Muito bom)	0,81 (Muito bom)	17,1 (Satisfatório)	0,43 (Muito bom)
Caraúbas / 2047	0,82 (Muito bom)	0,81 (Muito bom)	16,8 (Satisfatório)	0,43 (Muito bom)

Fonte: Autoria própria (2025)

Na etapa de validação, essa coerência é mantida, com o modelo reproduzindo satisfatoriamente a dinâmica hidrológica da série, ainda que pequenas discrepâncias sejam observadas nos picos mais extremos, comportamento recorrente em bacias semiáridas (Figura 25). De modo geral, os resultados gráficos corroboram os indicadores estatísticos, reforçando a confiabilidade do modelo para a simulação de vazões na estação de Caraúbas, tanto para o cenário de 2020 quanto para os cenários futuros, conforme apresentado no Anexo I.

Figura 25 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 1994



Fonte: Autoria própria (2025)

5.2.2. Estação Poço de Pedras

A validação do modelo hidrológico com dados de vazão da estação Poço de Pedras (Tabela 18) indicou desempenho estatisticamente consistente em todos os cenários avaliados. Os valores de R² permaneceram elevados, entre 0,83 e 0,84, o que evidencia uma forte correlação entre as vazões simuladas e observadas. De modo semelhante, os coeficientes de eficiência de NSE, com valores entre 0,75 e 0,81, foram classificados como muito bons, evidenciando a capacidade do modelo de representar adequadamente a dinâmica hidrológica da bacia.

Os valores de RSR situaram-se entre 0,43 e 0,50, classificados como muito bons em todos os cenários, o que indica baixos erros normalizados nas simulações. Entretanto, os resultados de PBIAS apresentaram valores elevados, variando de 54,1% no cenário de 1994 a aproximadamente 32,7% nos cenários mais recentes, o que os classifica como insatisfatórios e sugere uma tendência sistemática de superestimação ou subestimação das vazões.

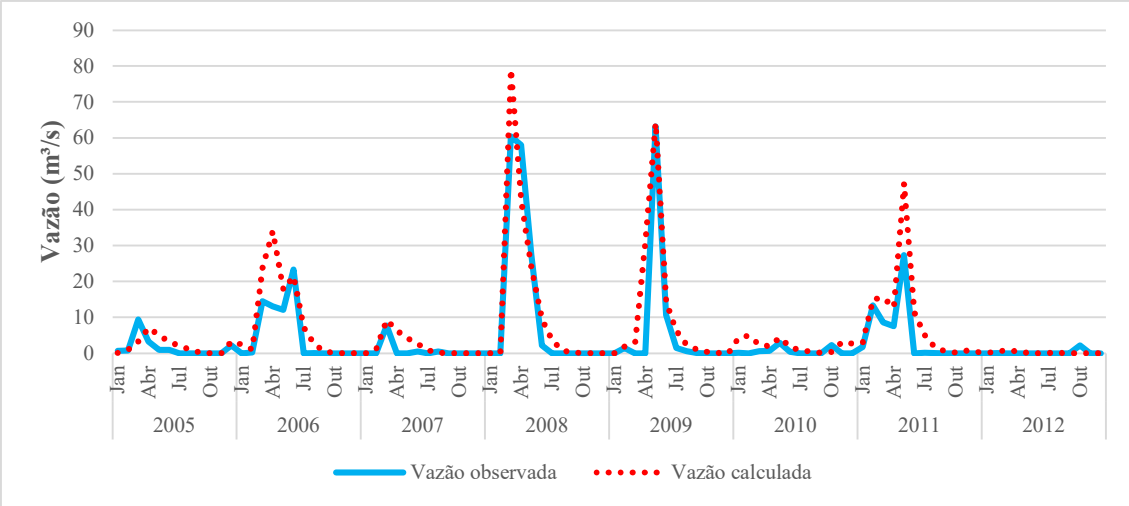
Tabela 18 - Validação para a estação Poço de Pedras

Estação / Cenário	R ²	NSE	PBIAS (%)	RSR
Poço de Pedras / 1994	0,83 (Muito bom)	0,75 (Muito bom)	54,1 (Insatisfatório)	0,50 (Muito bom)
Poço de Pedras / 2020	0,84 (Muito bom)	0,80 (Muito bom)	39,1 (Insatisfatório)	0,44 (Muito bom)
Poço de Pedras / 2027	0,84 (Muito bom)	0,81 (Muito bom)	35,43 (Insatisfatório)	0,43 (Muito bom)
Poço de Pedras / 2032	0,84 (Muito bom)	0,81 (Muito bom)	33,6 (Insatisfatório)	0,43 (Muito bom)
Poço de Pedras / 2037	0,84 (Muito bom)	0,81 (Muito bom)	32,9 (Insatisfatório)	0,43 (Muito bom)
Poço de Pedras / 2042	0,84 (Muito bom)	0,81 (Muito bom)	32,8 (Insatisfatório)	0,43 (Muito bom)
Poço de Pedras / 2047	0,84 (Muito bom)	0,81 (Muito bom)	32,7 (Insatisfatório)	0,43 (Muito bom)

Fonte: Autoria própria (2025)

Na etapa de validação Figura 26, a coerência entre as séries observadas e simuladas é mantida, evidenciando a consistência dos parâmetros calibrados e a robustez do modelo para simular diferentes condições hidrológicas. Esses resultados reforçam a aplicabilidade do SWAT para análises de disponibilidade hídrica na sub-bacia de Poço de Pedras, tanto para o cenário de 1994 quanto para os cenários futuros, conforme apresentado no Anexo I.

Figura 26 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 1994



Fonte: Autoria própria (2025)

CAPÍTULO 6

Neste capítulo será discutido as considerações sobre a calibração e validação do modelo hidrológico. Além disso, o capítulo abordará a análise detalhada da produção de lâmina escoada, da geração de sedimentos e das vazões médias das bacias, permitindo avaliar os efeitos das mudanças no uso e ocupação do solo sobre a disponibilidade hídrica e os processos hidrossedimentológicos.

6.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DESEMPENHO DO MODELO

6.2.1. Estação Caraúbas

Os indicadores estatísticos obtidos na etapa de calibração (1994–2004) confirmam o bom desempenho do modelo, com valores de R^2 e NSE variando entre 0,88 e 0,90, classificados como muito bons em todos os anos analisados. O índice RSR manteve-se em níveis reduzidos (0,32–0,35), reforçando a elevada precisão das simulações. A maior variação foi observada no PBIAS, que passou de –6,1% em 1994 para valores entre –14% e –19% nos demais anos, indicando uma tendência à subestimação das vazões simuladas em períodos mais recentes, ainda que dentro de faixas consideradas aceitáveis pela literatura especializada.

Na fase de validação (2005–2012), os resultados permaneceram coerentes, com R^2 e NSE situando-se entre 0,80 e 0,82, mantendo a classificação de desempenho como muito bom em todos os cenários. Entretanto, o PBIAS assumiu valores positivos, variando de 16,5% a 25,2%, o que indica uma tendência à superestimação das vazões, sendo o valor máximo classificado como insatisfatório. Ainda assim, o RSR apresentou baixa variação (0,43–0,44), demonstrando que, apesar das diferenças na magnitude das vazões simuladas, o modelo foi capaz de reproduzir adequadamente o comportamento temporal da série.

O período de validação foi restrito, deliberadamente limitada ao período 2005–2012, uma vez que, a partir desse período, o estado da Paraíba enfrentou uma das secas mais severas de sua história recente (2012–2017), caracterizando uma anomalia hidrológica extrema. Considerando que o SWAT não possui capacidade de representar eventos dessa magnitude sem a incorporação explícita de condições de crise hídrica no sistema, a inclusão desse intervalo poderia comprometer os indicadores estatísticos e levar a interpretações distorcidas do desempenho do modelo. Dessa forma, a adoção do período citado assegura uma avaliação mais realista e representativa do regime hidrológico típico da bacia.

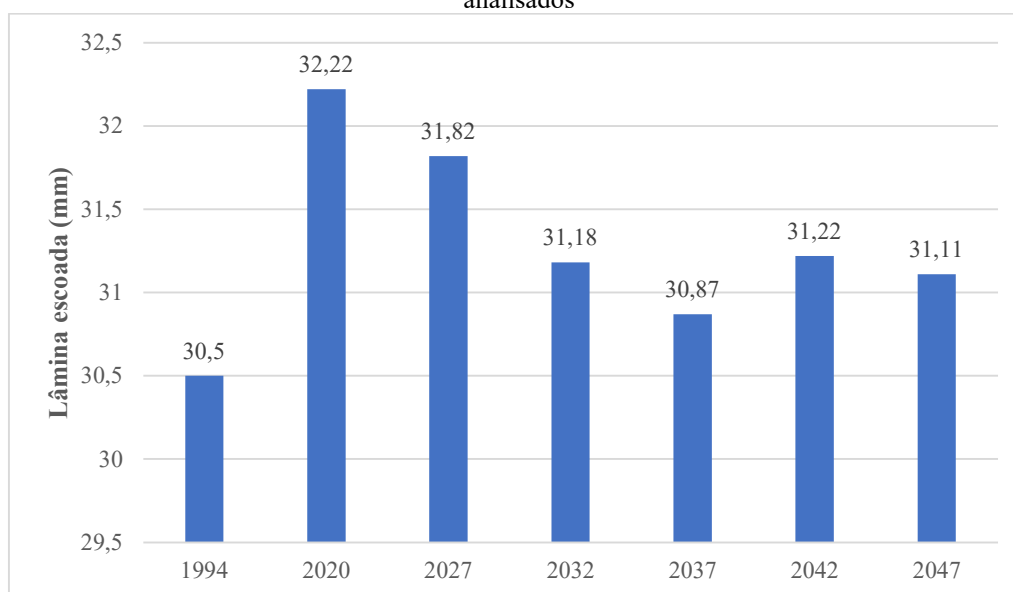
De maneira geral, os resultados apresentados nas tabelas 13 e 16 indicam que o comportamento do modelo para a sub-bacia do Alto rio Paraíba, estação Caraúbas é robusto, com baixa variabilidade nos indicadores de desempenho ao longo dos anos e sem necessidade de ajustes adicionais, sobretudo nos parâmetros associados ao escoamento superficial e à resposta do aquífero. As diferenças observadas no PBIAS entre as fases de

calibração, caracterizada por subestimação, e de validação, marcada por superestimação, refletem possíveis mudanças sazonais ou estruturais na geração de vazão ao longo das últimas décadas, sem comprometer, contudo, a confiabilidade do modelo, que se mantém dentro dos critérios recomendados para aplicações hidrológicas em bacias semiáridas.

6.2.2. Considerações sobre a produção hídrica, a geração de sedimentos e o regime de vazões médias na bacia do Alto rio Paraíba

A avaliação da lâmina escoada anual para os distintos cenários de uso e cobertura da terra (Figura 27) revela alterações de pequena magnitude no comportamento hidrológico da bacia do Alto Rio Paraíba ao longo do período estudado. Entre 1994 e 2020, registrou-se um incremento de aproximadamente 5,6% na lâmina escoada anual, variação que, à primeira vista, pode sugerir influência limitada das mudanças no uso do solo sobre a produção hídrica, conforme também apontado por Aragão et al. (2025). Contudo, essa interpretação não reflete plenamente a dinâmica observada. A análise da distribuição espacial das classes de cobertura (Figura 18 e Tabela 9) evidencia uma redução significativa das áreas agrícolas e uma expansão expressiva da classe pastagem, que, no contexto regional, corresponde predominantemente à caatinga rasteira. Nos cenários futuros (2027–2047), os valores simulados oscilam em torno de 31 mm, sem apresentar tendência definida de aumento ou diminuição, indicando a manutenção de um regime relativamente estável de geração de escoamento. Esses resultados sugerem que as principais modificações hidrológicas ocorreram no período histórico recente, enquanto as projeções apontam para uma estabilização da resposta da bacia frente às mudanças no uso e cobertura da terra.

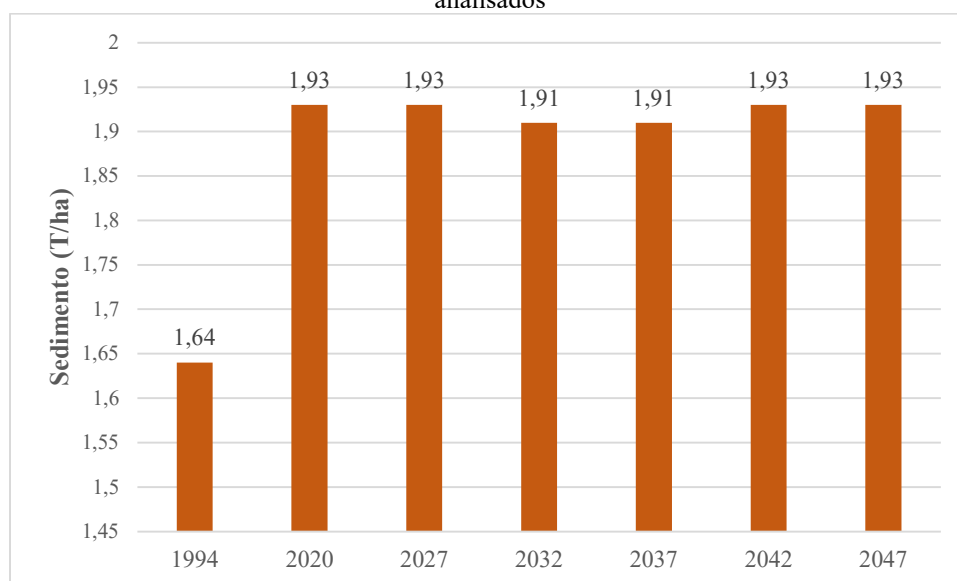
Figura 27 -Lâmina escoada anual para sub-bacia do Alto rio Paraíba, estação Caraúbas nos cenários analisados



Fonte: Autoria própria (2025)

A produção de sedimentos (Figura 28) apresentou comportamento mais sensível às mudanças no uso e cobertura da terra quando comparada à lâmina escoada. Entre 1994 e 2020, verificou-se um incremento expressivo de aproximadamente 17,7% na produção anual de sedimentos, evidenciando intensificação dos processos erosivos decorrente das transformações antrópicas na bacia. Nos cenários futuros, os valores mantêm-se praticamente constantes, variando entre 1,91 e 1,93 t/ha, o que indica uma tendência de estabilização do regime erosivo sob os padrões simulados de ocupação do solo. Esse comportamento reforça que o principal impacto hidrossedimentológico ocorreu no período histórico recente, destacando a elevada sensibilidade da produção de sedimentos às alterações espaciais e a vulnerabilidade erosiva da bacia do Alto Rio Paraíba.

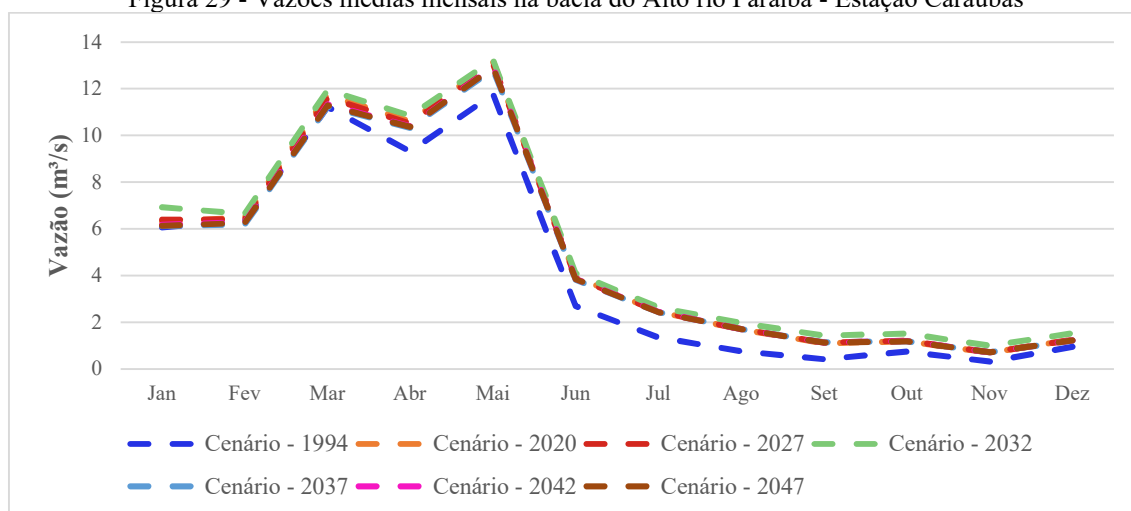
Figura 28 - Produção de sedimentos para sub-bacia do Alto rio Paraíba, estação Caraúbas nos cenários analisados



Fonte: Autoria própria (2025)

A análise comparativa das vazões médias mensais entre os cenários de uso e cobertura da terra de 1994 e 2020 (Figura 29) evidencia elevação consistente das vazões na maior parte do ano, com maior destaque para os meses de março a maio. Observou-se um aumento acumulado de aproximadamente 9,9% na vazão média simulada em 2020 em relação a 1994. Esse resultado indica que as transformações no uso e ocupação do solo favoreceram a intensificação do escoamento superficial durante, resultando em uma resposta hidrológica mais intensa e acelerada da bacia. Para os cenários prospectivos, o padrão de incremento é preservado, porém com discreta atenuação em comparação a 2020, apontando para uma tendência de estabilização do regime de escoamento nesse período.

Figura 29 - Vazões médias mensais na bacia do Alto rio Paraíba - Estação Caraúbas



Fonte: Autoria própria (2025)

6.2.3. Estação Poço de Pedras

No que se refere aos indicadores estatísticos obtidos na calibração, os resultados foram satisfatórios em todos os anos analisados, com valores de R^2 variando entre 0,82 e 0,83 e NSE entre 0,72 e 0,79, mantendo classificações entre boas e muito boas. O índice RSR apresentou um leve incremento ao longo do período, passando de 0,46 para 0,53, ainda dentro dos limites considerados aceitáveis. A maior variação foi observada no PBIAS, que evoluiu de -24,8% em 1994, indicando subestimação mais acentuada das vazões, para valores próximos de -3% nos cenários mais recentes, evidenciando um ajuste progressivo do modelo ao comportamento hidrológico da sub-bacia. Essa redução do viés sugere que o processo de calibração foi eficaz na minimização de erros sistemáticos ao longo do tempo, enquanto os demais indicadores permaneceram relativamente estáveis.

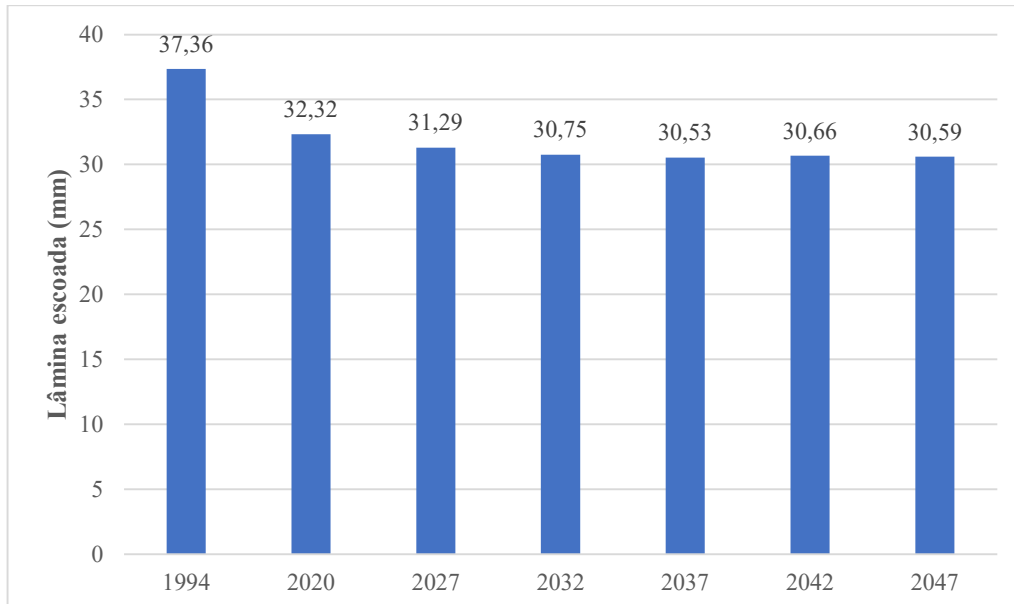
Durante a etapa de validação, os valores de R^2 e NSE, situando-se entre 0,83 e 0,84 e entre 0,75 e 0,81, respectivamente, o que demonstra a boa capacidade preditiva do modelo. Entretanto, o PBIAS apresentou valores positivos elevados, variando de 32,7% a 54,1%, indicando uma tendência persistente de superestimação das vazões simuladas. Ainda assim, o RSR manteve-se em níveis baixos (0,43–0,50).

A principal limitação observada refere-se ao PBIAS na validação, que indicou tendência sistemática de superestimação das vazões, possivelmente associada à representação dos efeitos de reservatórios, às perdas por evaporação em pequenas acumulações ou a diferenças sazonais na geração do escoamento superficial. Apesar disso, o desempenho global do modelo mostrou-se consistente e adequado para análises hidrológicas em escala de bacia, sendo respaldado pela robustez dos demais indicadores estatísticos.

A análise da lâmina escoada anual na bacia do rio Taperoá (Figura 30) evidencia uma tendência de redução progressiva ao longo dos cenários de uso e ocupação do solo. Entre 1994 e 2020, os valores diminuíram de 37,36 mm para 32,32 mm, correspondendo a uma redução de aproximadamente 13,5%, enquanto no cenário futuro de 2047 a lâmina escoada atinge 30,59 mm, totalizando uma diminuição acumulada de cerca de 18,2% em relação a 1994. Nos cenários prospectivos, os valores oscilam em torno de 30–31 mm, indicando estabilização do regime de escoamento superficial. Esse comportamento difere do observado na bacia do Alto Paraíba, onde foi registrado incremento da lâmina escoada entre 1994 e 2020, evidenciando respostas hidrológicas contrastantes entre as duas bacias,

possivelmente associadas a diferenças na dinâmica de uso da terra e nas características fisiográficas.

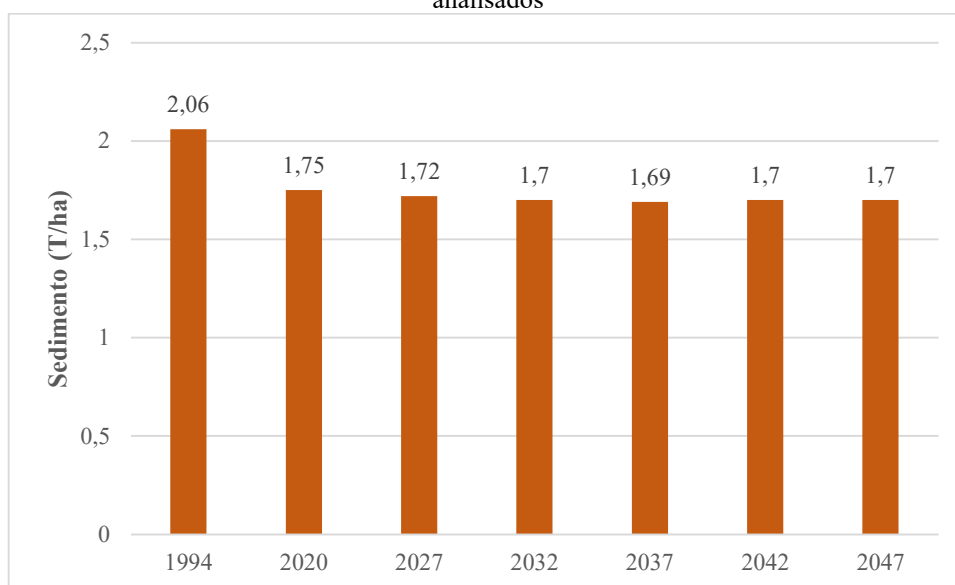
Figura 30 – Lâmina escoada anual para sub-bacia do rio Taperoá, estação Poço de Pedras nos cenários analisados



Fonte: Autoria própria (2025)

Para a produção de sedimentos (Figura 31), os resultados mostram igualmente uma tendência de decréscimo na bacia do Taperoá, com redução de 2,06 t/ha em 1994 para 1,75 t/ha em 2020 ($\approx 15,0\%$) e estabilização em torno de 1,70 t/ha nos cenários futuros, representando uma diminuição acumulada de aproximadamente 17,5% até 2047. Essa redução sugere atenuação dos processos erosivos e maior controle da perda de solo ao longo do tempo. Em contraste, na bacia do Alto Paraíba observou-se aumento expressivo da produção de sedimentos no período histórico recente, indicando maior sensibilidade às mudanças no uso e cobertura da terra. Assim, enquanto o Taperoá apresenta tendência de estabilização e redução da carga sedimentar, o Alto Paraíba revela intensificação dos processos erosivos, reforçando a heterogeneidade das respostas hidrossedimentológicas entre as bacias analisadas.

Figura 31 - Produção de sedimentos para sub-bacia do rio Taperoá, estação Poço de Pedras nos cenários analisados



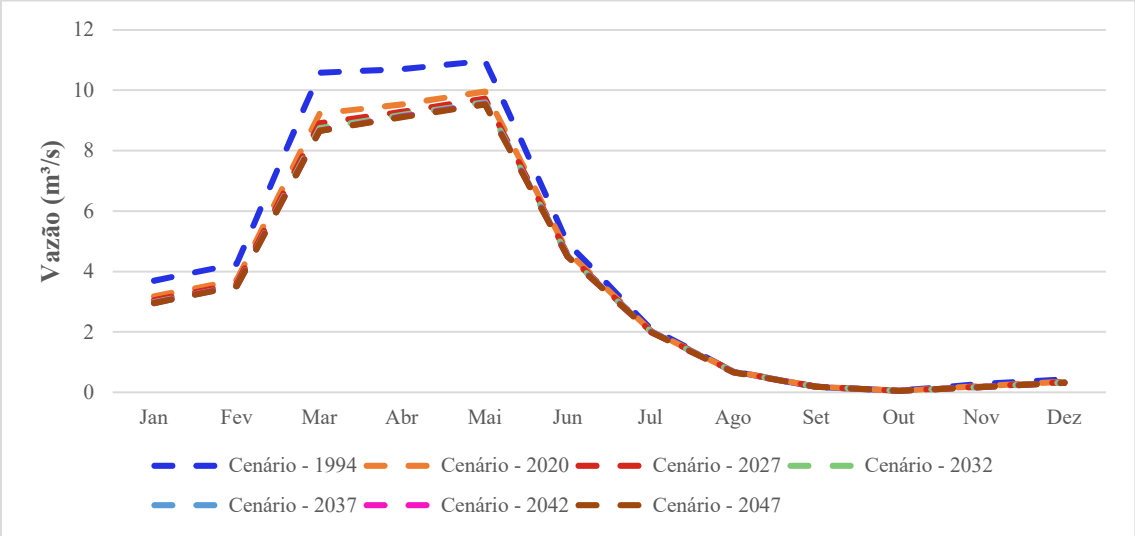
Fonte: Autoria própria (2025)

A análise das vazões médias mensais da bacia do rio Taperoá (Figura 32) evidencia uma tendência consistente de redução ao longo do período analisado. Entre 1994 e 2020, observa-se decréscimo generalizado em praticamente todos os meses, com reduções mais expressivas no período chuvoso principal (março a maio): em março a vazão média diminuiu cerca de 12,9%, em abril aproximadamente 10,9% e em maio cerca de 9,3%. No cenário futuro de 2047, essa tendência se intensifica, com reduções acumuladas em relação a 1994 da ordem de 18,3% em março, 14,8% em abril e 13,1% em maio. Esses resultados indicam enfraquecimento progressivo da resposta hidrológica da bacia, com menor geração de escoamento mesmo nos meses de maior aporte pluviométrico, sugerindo efeitos combinados das mudanças no uso e cobertura da terra e das características fisiográficas locais.

Quando comparados aos resultados da bacia do Alto Rio Paraíba, observa-se um comportamento contrastante. Enquanto no Taperoá predomina a redução das vazões médias ao longo do tempo, no Alto Paraíba foi identificado aumento significativo das vazões no período histórico recente (1994–2020), especialmente entre março e maio, seguido por leve estabilização nos cenários futuros. Esse contraste evidencia que a bacia do Taperoá apresenta maior sensibilidade à diminuição do escoamento superficial e possivelmente maior capacidade de retenção ou infiltração, ao passo que o Alto Paraíba respondeu com intensificação da geração de escoamento. Assim, os resultados reforçam a heterogeneidade das respostas hidrológicas entre as duas bacias, destacando a

importância das diferenças no padrão de uso da terra, na cobertura vegetal e nas condições geomorfológicas e climáticas no controle da dinâmica de vazões.

Figura 32 - Vazões médias mensais na bacia do rio Taperoá - Estação Poço de Pedras



Fonte: Autoria própria (2025)

CAPÍTULO 7

Será apresentada as conclusões gerais da dissertação, integrando os principais achados sobre os impactos das mudanças no uso e cobertura da terra em regiões semiáridas.

7.1. CONCLUSÃO

O presente estudo aprofundou a compreensão dos efeitos das mudanças no uso e na cobertura da terra sobre a disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas inseridas no semiárido brasileiro, a partir de uma abordagem integrada que combinou revisão bibliográfica sistemática, sensoriamento remoto e modelagem hidrológica distribuída. Essa integração metodológica permitiu analisar não apenas volumes médios de vazão, mas também componentes hidrológicos sensíveis às transformações espaciais, como a lâmina escoada, a produção de sedimentos e a redistribuição temporal das vazões.

A análise da literatura recente, com ênfase em estudos conduzidos em regiões semiáridas em escalas global e nacional, evidenciou a ampla aplicabilidade do modelo SWAT para a representação de processos hidrológicos em ambientes caracterizados por elevada variabilidade climática e forte controle fisiográfico. A escolha do modelo mostrou-se coerente com os objetivos do estudo, considerando sua capacidade de integrar dados espaciais de uso e cobertura da terra, representar processos físicos do ciclo hidrológico e simular cenários contrastantes de ocupação do solo, amplamente reportados na literatura revisada.

A aplicação do SWAT às bacias do Alto rio Paraíba, do rio Taperoá e à sub-bacia associada ao reservatório Santo Antônio resultou em desempenhos estatísticos satisfatórios nas etapas de calibração e validação, com valores de R^2 , NSE e RSR enquadrados nas classes “boas” a “muito boas” segundo critérios consolidados na literatura. A relativa estabilidade dos parâmetros calibrados entre os diferentes cenários reforça a consistência da representação dos processos hidrológicos dominantes, particularmente aqueles associados ao controle climático, à infiltração e à dinâmica do escoamento em bacias semiáridas.

As simulações evidenciaram respostas hidrológicas contrastantes entre as bacias analisadas. Na bacia do Alto rio Paraíba, observaram-se aumentos da lâmina escoada, da produção de sedimentos e das vazões médias mensais no período chuvoso (especialmente entre março e maio), indicando intensificação do escoamento superficial. Esse comportamento está associado, em termos de magnitude hidrológica, a mudanças no uso e na cobertura da terra que favoreceram maior conectividade hidrológica e mobilização de sedimentos, ainda que sem provocar alterações expressivas na vazão média anual.

Em contraste, na bacia do rio Taperoá verificou-se redução progressiva da lâmina escoada, da produção de sedimentos e das vazões médias mensais ao longo dos cenários

analisados. Esses resultados sugerem maior capacidade de retenção hídrica e menor resposta erosiva, possivelmente associadas à combinação entre características fisiográficas, propriedades dos solos e padrões específicos de ocupação da terra, reforçando a heterogeneidade das respostas hidrológicas mesmo entre bacias inseridas no mesmo contexto climático semiárido.

A análise conjunta da lâmina escoada, da produção de sedimentos e das vazões médias indica que os impactos das mudanças no uso e na cobertura da terra se manifestam de forma mais sensível nos processos hidrossedimentológicos e na redistribuição temporal das vazões do que nos valores médios anuais. Assim, a ausência de variações expressivas na vazão média anual não deve ser interpretada como ausência de impacto hidrológico, mas como resultado de uma compensação espacial e temporal típica de sistemas semiáridos, nos quais o controle climático exerce papel dominante.

Na escala da sub-bacia associada ao reservatório Santo Antônio, os resultados reforçaram a predominância do controle climático, evidenciando variações pouco expressivas nas vazões médias simuladas mesmo diante de mudanças graduais no uso do solo. Esse comportamento destaca a influência da irregularidade pluviométrica, da elevada evapotranspiração potencial e das condições edafoclimáticas típicas do bioma Caatinga, ressaltando a necessidade de cautela na interpretação de indicadores exclusivamente baseados em vazões médias.

Do ponto de vista ecológico e terminológico, os resultados foram interpretados de forma consistente com o contexto do bioma Caatinga, considerando que classes agregadas nos produtos do MapBiomas e na parametrização do SWAT (como formações savânicas e pastagens) representam, no contexto regional, diferentes estágios e fisionomias da vegetação nativa e de áreas antropizadas da Caatinga.

Nesse contexto, as evidências obtidas sustentam a importância estratégica de diretrizes de conservação ambiental voltadas à proteção da vegetação ripária e das áreas de recarga, ao controle dos processos erosivos e à redução do assoreamento de reservatórios. Mesmo em cenários nos quais as vazões médias aparentam estabilidade, os incrementos na produção de sedimentos e na lâmina escoada indicam riscos relevantes para a sustentabilidade dos sistemas hídricos, especialmente no que se refere à perda de capacidade de armazenamento e à segurança hídrica.

Por fim, os resultados demonstram que a gestão sustentável dos recursos hídricos em bacias semiáridas deve priorizar o planejamento integrado em escala de bacia, considerando simultaneamente clima, uso da terra, solos e processos

hidrossedimentológicos. A abordagem adotada evidencia o potencial da modelagem hidrológica associada ao sensoriamento remoto como ferramenta técnico-científica de apoio à tomada de decisão, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias mais resilientes frente à variabilidade climática e às pressões antrópicas em regiões onde a água é um recurso limitado e estratégico.

REFERÊNCIAS

ABBASI, A. et al. Potential influence of climate and land-use changes on green water security in a semi-arid catchment. **Journal of Water and Climate Change**, 10 jun. 2021.

ABBASPOUR, K. C. et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 733–752, maio 2015.

ABBASPOUR, K. C. et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 333, n. 2-4, p. 413–430, fev. 2007.

ABD EL-HAMID, H. T. et al. Effects of land use/land cover and climatic change on the ecosystem of North Ningxia, China. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, n. 20, out. 2020.

ABD-ELMABOUD, M. E. et al. Evaluation of groundwater potential using ANN-based mountain gazelle optimization: A framework to achieve SDGs in East El Oweinat, Egypt. **Journal of Hydrology Regional Studies**, v. 52, p. 101703–101703, 12 fev. 2024.

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba: RF-02 A - Diagnósticos/Governo do Estado da Paraíba. João Pessoa, 2022.

AESA - AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. Relatório de regionalização hidrográfica e climática da Paraíba. João Pessoa: AESA, 2022.

AYIEKO, A. et al. Spatial modeling of groundwater across land use land cover and climate change gradient using SWAT and Logan’s method: a case study of Mbagathi sub-catchment. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 10, n. 1, p. 285–301, 10 abr. 2023.

AIT M’BAREK, S. et al. The combined impact of climate change scenarios and land use changes on water resources in a semi-arid watershed. **Scientific African**, v. 25, p. e02319, set. 2024.

A.K. PRIYA et al. Impact of climate change and anthropogenic activities on aquatic ecosystem – A review. **Environmental Research**, v. 238, p. 117233–117233, 1 dez. 2023.

ALAM, N. et al. Modelagem de predição da dinâmica da paisagem ribeirinha no contexto do manejo sustentável de planícies de inundação: uma abordagem geoespacial. *Annals of GIS*, 27 (3), 299–314, 2021.

AL-GHOBARI, H.; DEWIDAR, A.; ALATAWAY, A. Estimation of Surface Water Runoff for a Semi-Arid Area Using RS and GIS-Based SCS-CN Method. **Water**, v. 12, n. 7, p. 1924, 6 jul. 2020.

AL KHOURY, I.; BOITHIAS, L.; LABAT, D. A Review of the Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) in Karst Watersheds. **Water**, v. 15, n. 5, p. 954, 1 mar. 2023.

AL-KUBAISI, M.; AL-KUBAISI, Q. Applying SWAT Model to Estimate the Annual Runoff of Wadi Al-Mohammadi Basin, Western Iraq. **Iraqi Geological Journal**, v. 55, n. 2E, p. 189–200, 30 nov. 2022.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.

ALVES, T. L. B. et al. (2018). Evolução espaço-temporal do albedo e da cobertura vegetal da superfície na Bacia Hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba. **Geosul**, v. 33, n. 66, p. 147-171.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Conservação e uso racional da água em bacias hidrográficas. Brasília: ANA, 2017.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2023. Brasília: ANA, 2023.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. ATLAS ÁGUAS: Resumo de Investimentos nos Estados (Região Nordeste), 2021. Acesso: Setembro de 2023. Disponível em: <http://atlas.ana.gov.br/>

ANANDHARUBAN PANCHANATHAN; HAGHIGHI, A. T.; MOURAD OUSSALAH. A multi-criteria approach for improving streamflow prediction in a rapidly urbanizing data scarce catchment. **International Journal of River Basin Management**, p. 1–14, 15 mar. 2023.

ANDRADE, C. W. L. DE et al. Soil moisture and discharge modeling in a representative watershed in northeastern Brazil using SWAT. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 19, n. 2, p. 238–251, 1 abr. 2019.

ANDRADE, E. M. et al. Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 27, p. 100649, 1 fev. 2020.

ANJOS, R. L. D. O desempenho da PARAÍBA no contexto da economia nordestina (2002-2015). Monografia (Bacharel em Economia) - Curso de Ciências Econômicas, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2017.

ANOUAR HACHEMAOUI et al. Assessment of the hydrological impact of land use/cover changes in a semi-arid basin using the SWAT model (case of the Oued Saïda

basin in western Algeria). **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 8, n. 4, p. 5611–5624, 16 maio 2022.

ARAGAO, R.; SANTOS, V. S.; MIRANDA, J. M. S.; ANDRADE, R. M.; RUFINO, I. A. A.; SANTOS, L. L.; ALVES, L. M.; SRINIVASAN, V. S. Avaliação da influência do uso e ocupação do solo sobre a produção de água e sedimentos numa sub-bacia do rio paraíba na região do cariri paraibano. In: XXVI SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2025, Vitória - ES. XXVI SBRH, 2025.

ARNOLD, J. G. et al. LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT PART I: MODEL DEVELOPMENT. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89, fev. 1998.

ARNOLD, J. G. et al. SWAT: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.

ASMAR, N. F. et al. Effect of Land Use\Land Cover Changes on Estimated Potential Runoff in the Nablus Mountains Watersheds of Palestine: A Case Study. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 49, n. 5, p. 1067–1080, 3 jan. 2021.

ATLAS PLUVIOMÉTRICO DO ESTADO DA PAÍRABA – Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/biblioteca/atlas-pluviometrico-da-paraiba/>>. Acesso: 01. dez. 2025.

AUTHER MAVIZA; AHMED, F. Analysis of past and future multi-temporal land use and land cover changes in the semi-arid Upper-Mzingwane sub-catchment in the Matabeleland south province of Zimbabwe. v. 41, n. 14, p. 5206–5227, 12 abr. 2020.

BAI, P.; LIU, X.; XIE, J. Simulating runoff under changing climatic conditions: A comparison of the long short-term memory network with two conceptual hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 592, p. 125779, jan. 2021.

BEN KHELIFA, W. et al. Evaluation of bench terracing model parameters transferability for runoff and sediment yield on catchment modelling. **Journal of African Earth Sciences**, v. 178, p. 104177, jun. 2021.

BENNETT, N. D. et al. Characterising performance of environmental models. **Environmental Modelling & Software**, v. 40, p. 1–20, fev. 2013.

BEUCHLE, R. et al. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116–127, mar. 2015.

BIRO TURK, K. G.; ALJUGHAIMAN, A. S. Land use/land cover assessment as related to soil and irrigation water salinity over an oasis in arid environment. **Open Geosciences**, v. 12, n. 1, p. 220–231, 1 jan. 2020.

BODDEPALLI MANIKANTA; YASWANTH, K. K. Impact assessment of future LULC and climate change on hydrology in the Upper Pennar basin, India. **Sustainable Water Resources Management**, v. 11, n. 2, 4 fev. 2025.

BOUCHAGOURA, L. et al. Integrating remote sensing classification techniques for land use mapping in semi-arid regions: a case study of the Tamoulouka basin, Algeria. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, n. 7, 8 jun. 2024.

BRASIL. Lei no 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília: Presidência da República, 2020a. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm>. Acesso: Dezembro de 2025.

BRITO, H. C. DE et al. Use of Spatial Data in the Simulation of Domestic Water Demand in a Semiarid City: The Case of Campina Grande, Brazil. *Urban Science*, v. 7, n. 4, p. 120, 1 dez. 2023.

BRITO, Y. M. A. DE et al. Panorama da seca plurianual 2012–2018 no semiárido brasileiro: impactos hidrológicos, agrícolas e medidas de convivência. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 58, 17 dez. 2021.

BUYTAERT, W. et al. Assessment and Management of Water Resources in Developing, Semi-arid and Arid Regions. **Water Resources Management**, v. 26, n. 4, p. 841–844, 26 fev. 2012.

CHAVES, I. B. et al. Precipitação e erosividade das chuvas do Estado da Paraíba. In: Congresso Técnico-científico da Engenharia e da Agronomia. Brasil, 2021.

CHEN, Y. et al. Study on streamflow response to land use change over the upper reaches of Zhanghe Reservoir in the Yangtze River basin. **Geoscience Letters**, v. 7, n. 1, 6 maio 2020.

CORREIA, I. M. G. et al. Mata ciliar, conservação e sustentabilidade, fundamentos da importância para o semiárido paraibano: estudo de caso no alto curso do Rio Paraíba. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 5, n. 2, p. 41–60, 24 set. 2019.

DAN, D. et al. Quantitative impacts of climate change and human activities on runoff in the Huolin River catchment. **Journal of Water and Climate Change**, 7 nov. 2022.

DASH, S. S.; SAHOO, B.; RAGHUWANSHI, N. S. How reliable are the evapotranspiration estimates by Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and Variable Infiltration Capacity (VIC) models for catchment-scale drought assessment and irrigation planning? **Journal of Hydrology**, v. 592, p. 125838, jan. 2021.

DE, C. et al. Run-off–erosion modelling and water balance in the Epitácio Pessoa Dam river basin, Paraíba State in Brazil. **International journal of environmental science and technology**, v. 16, n. 7, p. 3035–3048, 9 ago. 2018.

DE FARIAS, A. A.; DE SOUSA, F. DE A. S. Caracterização e análise das secas na sub-bacia hidrográfica do Rio Taperoá. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 4, p. 1483–1501, 11 jun. 2020.

DE MEDEIROS, C. et al. Run-off–erosion modelling and water balance in the Epitácio Pessoa Dam river basin, Paraíba State in Brazil. **International journal of environmental science and technology**, v. 16, n. 7, p. 3035–3048, 9 ago. 2018.

- DEMISSIE, T. A. Land use and land cover change dynamics and its impact on watershed hydrological parameters: the case of Awetu watershed, Ethiopia. **Journal of Sedimentary Environments**, 3 jan. 2022.
- DE OLIVEIRA, M. L. et al. Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 835, p. 155490, 20 ago. 2022.
- DE PAULA SOUSA JÚNIOR, V. et al. Land-Use and Land-Cover Dynamics in the Brazilian Caatinga Dry Tropical Forest. **Conservation**, v. 2, n. 4, p. 739–752, 1 dez. 2022.
- DIBABA, W. T.; DEMISSIE, T. A.; MIEGEL, K. Drivers and Implications of Land Use/Land Cover Dynamics in Finchaa Catchment, Northwestern Ethiopia. **Land**, v. 9, n. 4, p. 113, 8 abr. 2020.
- DILIBAIER AIBAIIDULA; ATES, N.; FILIZ DADASER-CELIK. Uncertainty analysis for streamflow modeling using multiple optimization algorithms at a data-scarce semi-arid region: Altınapa Reservoir Watershed, Turkey. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 37, n. 5, p. 1997–2011, 3 jan. 2023.
- DOLGORSUREN, S.-E. et al. Hydrological Responses to Climate Change and Land-Use Dynamics in Central Asia's Semi-arid Regions: An SWAT Model Analysis of the Tuul River Basin. **Earth Systems and Environment**, v. 8, n. 2, p. 297–323, 22 jan. 2024.
- DOS SANTOS, C. A. C. et al. Spatio-temporal patterns of energy exchange and evapotranspiration during an intense drought for drylands in Brazil. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 85, p. 101982, mar. 2020.
- DUC, L.; SAWADA, Y. A signal-processing-based interpretation of the Nash–Sutcliffe efficiency. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 27, n. 9, p. 1827–1839, 9 maio 2023.
- EL-RAWY, M. et al. Climate Change Impacts on Water Resources in Arid and Semi-Arid Regions: A Case Study in Saudi Arabia. **Water**, v. 15, n. 3, p. 606, 1 jan. 2023.
- FATHIA JARRAY et al. Long-Term Impact of Soil and Water Conservation Measures on Soil Erosion in a Tunisian Semi-Arid Watershed. **Land**, v. 12, n. 8, p. 1537–1537, 3 ago. 2023.
- FERRAZ, L. L. et al. Land use changes and hydrological trend analysis in a Brazilian Cerrado basin. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, n. 8, p. 7469–7482, 20 set. 2021.
- FERRAZ, R. et al. Sink or carbon source? how the *Opuntia* cactus agroecosystem interacts in the use of carbon, nutrients and radiation in the Brazilian semi-arid region. **Journal of Hydrology**, v. 625, p. 130121–130121, 1 out. 2023.
- FERREIRA, P. M. DE L.; PAZ, A. R. DA; BRAVO, J. M. Objective functions used as performance metrics for hydrological models: state-of-the-art and critical analysis. **RBRH**, v. 25, 2020.

FERREIRA, Y. B. C. et al. Meio ambiente e sociedade: análises, diálogos e conflitos ambientais. Campina Grande: Editora Amplla, 2020. E-book. Disponível em: <https://ampllaeditora.com.br/books/2020/08/eBook-Meio-Ambiente.pdf>

FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D. Climatologia do Estado da Paraíba. Campina Grande: **EDUFCG**, 2017.

FREIRE, G. et al. Streamflow prediction based on the Soil and Water Assessment Tool in the Pajeú river basin, Brazilian semiarid. **Journal of South American Earth Sciences**, p. 105420–105420, 1 fev. 2025.

FREITAS, F. A. et al. (2020). Estrutura fitossociológica da vegetação arbóreo-arbustiva em área de caatinga com histórico de perturbação antrópica na Paraíba, Brasil. **Acta Biológica Catarinense**, v. 7, n. 1, p. 92-102.

FREITAS, M. A. DE S. Gestão e modelagem hídrica em bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 8344–8351, 2019.

GAO, X. et al. Separating Wet and Dry Years to Improve Calibration of SWAT in Barrett Watershed, Southern California. **Water**, v. 10, n. 3, p. 274–274, 5 mar. 2018.

GASSMAN, P. W. et al. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007.

GHANNADI, M. A. et al. VERTICAL ACCURACY ASSESSMENT OF COPERNICUS DEM (CASE STUDY: TEHRAN AND JAM CITIES). *ISPRS annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, v. X-4/W1-2022, p. 209–214, 13 jan. 2023.

GOVENDER, T.; DUBE, T.; SHOKO, C. Remote sensing of land use-land cover change and climate variability on hydrological processes in Sub-Saharan Africa: key scientific strides and challenges. **Geocarto International**, p. 1–25, 21 mar. 2022.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 4, n. 2, p. 135–143, abr. 1999.

GURARA, M. A.; JILO, N. B.; TOLCHE, A. D. Modeling Climate Change Impact on the Streamflow in the Upper Wabe Bridge Watershed in Wabe Shebele River Basin, Ethiopia. **International Journal of River Basin Management**, p. 1–46, 30 maio 2021.

HARI KRISHNA, B.; MANI, A.; UMA DEVI, M.; RAMULU, V. Simulation of impact of change in land use on water yield of upper Manair catchment. **International Journal of Innovative Research and Development**, v. 3, p. 592–600, 2014.

HERMASSI, T. et al. Integrative hydrologic modelling of soil and water conservation strategies: a SWAT-based evaluation of environmental resilience in the Merguellil watershed, Tunisia. **Frontiers in Water**, v. 7, 4 fev. 2025.

HERNÁNDEZ-MARÍN, M. A. et al. Hydrological simulation using the SWAT model in a semi-arid region in the southern part of Zacatecas, Mexico. **Environmental Earth Sciences**, v. 83, n. 18, 1 set. 2024.

HORDOFA, A. T. et al. Climate Change Impacts on Blue and Green Water of Meki River Sub-Basin. **Water Resources Management**, 15 abr. 2023.

HU, Z.; LO, C. P. Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 31, n. 6, p. 667–688, 1 nov. 2007.

HUO, A. et al. Influence of landfill and land use scenario on runoff, evapotranspiration, and sediment yield over the Chinese Loess Plateau. **Ecological Indicators**, v. 121, p. 107208–107208, 1 fev. 2021.

IPCC, Core Writing Team Summary for Policymakers H. Lee, J. Romero (Eds.), Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland (2023), pp. 1-34, 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

ISLAM, K. I. et al. Exploring Random Forest Machine Learning and Remote Sensing Data for Streamflow Prediction: An Alternative Approach to a Process-Based Hydrologic Modeling in a Snowmelt-Driven Watershed. **Remote Sensing**, v. 15, n. 16, p. 3999, 1 jan. 2023.

JESUS et al. Influence of anthropization on the floristic composition and phytosociology of the Caatinga susceptible to desertification in the state of Sergipe, Brazil. **Tropical Ecology**, v. 63, n. 3, p. 398–408, 1 fev. 2022.

KHANSA GULSHAD; MICHAŁ SZYDŁOWSKI; MUSTAFA, A. Assessing climate change threats and urbanization impacts on surface runoff in Gdańsk (Poland): insights from remote sensing, machine learning and hydrological modeling. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 38, n. 12, p. 4825–4842, 13 nov. 2024.

KHALEGHI, M. R.; HOSSEINI, S. H. Using SWAT and SWAT-CUP for hydrological simulation and uncertainty analysis of the arid and semiarid watersheds (Case study: Zoshk Watershed, Shandiz, Iran). **Applied Water Science**, v. 14, n. 12, 29 nov. 2024.

KHELIFA, W. B. et al. Parameterization of the Effect of Bench Terraces on Runoff and Sediment Yield by Swat Modeling in a Small Semi-arid Watershed in Northern Tunisia. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 5, p. 1568–1578, 26 abr. 2017.

KOCH, H. et al. Effects of model calibration on hydrological and water resources management simulations under climate change in a semi-arid watershed. **Climatic Change**, v. 163, n. 3, p. 1247–1266, 18 nov. 2020.

KUMAR, A.; SINGH, A.; GAURAV, K. Assessing the synergic effect of land use and climate change on the upper Betwa River catchment in Central India under present, past, and future climate scenarios. **Environment, Development and Sustainability**, 4 abr. 2022.

LAABOUDI, M. et al. Assessment of water balance based on SWAT hydrological model: a case study of Oued Cherraa basin (Northeastern Morocco). **Environmental Geochemistry and Health**, v. 47, n. 4, 25 mar. 2025.

- LE, A.; PRICOPE, N. Increasing the Accuracy of Runoff and Streamflow Simulation in the Nzoia Basin, Western Kenya, through the Incorporation of Satellite-Derived CHIRPS Data. **Water**, v. 9, n. 2, p. 114, 13 fev. 2017.
- LEONARDO et al. Sensoriamento Remoto Aplicado na Geoespacialização do Reservatório Poço da Cruz - PE e seu Entorno. v. 14, n. 6, p. 3592–3592, 31 dez. 2021.
- LIMA, F. N. et al. (2017). Caracterização ambiental da sub-bacia do rio Taperoá – Paraíba. **Ambiência Guarapuava** (PR), v.13, n. 2, p. 284 – 300.
- LIN, J.; CHEN, Q. Analyzing and Simulating the Influence of a Water Conveyance Project on Land Use Conditions in the Tarim River Region. **Land**, v. 12, n. 11, p. 2073–2073, 18 nov. 2023.
- LÓPEZ-LAMBRANO, A. A. et al. Supply and Demand Analysis of Water Resources. Case Study: Irrigation Water Demand in a Semi-Arid Zone in Mexico. **Agriculture**, v. 10, n. 8, p. 333, 5 ago. 2020.
- LUCENA, D. P. M. M. (2018). Simulações da implantação de ações de gestão no Açude Epitácio Pessoa e seus impactos na crise hídrica em Campina Grande-PB e região. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental) - Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2018.
- MAGALHÃES, A. G. et al. Hydrological modeling of an experimental basin in the semiarid region of the Brazilian State of Pernambuco. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 13, n. 6, p. 1, 31 out. 2018.
- MAPBIOMAS. **Mapeamento anual de cobertura e uso da terra no Brasil entre 1985 e 2022** – Coleção 8. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org>. Acesso em: 18 jul. 2024.
- MARARAKANYE, N.; LE ROUX, J. J.; FRANKE, A. C. Long-term water quality assessments under changing land use in a large semi-arid catchment in South Africa. **Science of The Total Environment**, v. 818, p. 151670, abr. 2022.
- MARCOS, S. Identificação de áreas prioritárias para conservação da Caatinga na bacia do alto curso do Rio Paraíba/PB através do uso das geotecnologias. Ufpb.br, 2017.
- MARCUZZO, F. F. et al. (2012). Detalhamento Hidromorfológico da Bacia do Rio Paraíba. In: Anais do XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. João pessoa, 2012.
- MARENGO, J. A. et al. Droughts in Northeast Brazil: past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 149, p. 1–18, 2022.
- MATHEVET, T. et al. Multi-objective assessment of hydrological model performances using Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiencies on a worldwide large sample of watersheds. *Comptes Rendus. Géoscience*, v. 355, n. S1, p. 1–25, 24 jan. 2023.
- MEADOWS, M.; JONES, S.; REINKE, K. Vertical accuracy assessment of freely available global DEMs (FABDEM, Copernicus DEM, NASADEM, AW3D30 and SRTM) in flood-prone environments. **International Journal of Digital Earth**, v. 17, n. 1, 25 jan. 2024.

- MEBARKI, H.; MAREF, N.; DRIS, M. E.-A. Modelling the monthly hydrological balance using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: A case study of the Wadi Mina upstream watershed. **Journal of Groundwater Science and Engineering**, v. 12, n. 2, p. 161–177, jun. 2024.
- MEBRAHTE, M. et al. The impact of land use land cover change on hydropower potential in northern Ethiopia. **Sustainable Water Resources Management**, v. 10, n. 1, 29 jan. 2024.
- MENESES, R. A. et al. (2022). Operação de sistemas de abastecimento em épocas de crise hídrica: O caso de Campina Grande (2012-2017). In: Anais do XVI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste 15º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, Caruaru, 2022.
- MENGISTU, A. G.; VAN RENSBURG, L. D.; WOYESSA, Y. E. Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 25, p. 100621, out. 2019.
- MIRDASHTVAN, M. et al. Sustainable Water Supply and Demand Management in Semi-arid Regions: Optimizing Water Resources Allocation Based on RCPs Scenarios. **Water Resources Management**, v. 35, n. 15, p. 5307–5324, 28 out. 2021.
- MOAZENZADEH, R.; IZADY, A. A hybrid calibration method for improving hydrological systems using ground-based and remotely-sensed observations. **Journal of Hydrology**, v. 615, p. 128688, dez. 2022.
- MOHAMMED, R.; SCHOLZ, M. Adaptation Strategy to Mitigate the Impact of Climate Change on Water Resources in Arid and Semi-Arid Regions: a Case Study. **Water Resources Management**, v. 31, n. 11, p. 3557–3573, 27 abr. 2017.
- MOHARIR, K. N. et al. Estimation of land surface temperature and LULC changes impact on groundwater resources in the semi-arid region of Madhya Pradesh, India. **Advances in Space Research**, set. 2024.
- MORIASI, D. N. et al. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.
- MSIGWA, A. et al. Comparison of blue and green water fluxes for different land use classes in a semi-arid cultivated catchment using remote sensing. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 36, p. 100860, ago. 2021.
- NGUYEN, N. H. T.; BUI, T. L. Application of SWAT/MIKE tools for assessment of river water environmental capacity – Ben Tuong – Suoi Tre watershed, Binh Duong. In: **AIP Conference Proceedings**, 2023. p. 14.
- NASCIMENTO, Karyne da Silva. Modelagem das dinâmicas naturais e antrópicas da bacia de contribuição do sistema hídrico Poções–Epitácio Pessoa. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2025.

NASIRI, S.; ANSARI, H.; ZIAEI, A. N. Simulation of water balance equation components using SWAT model in Samalqan Watershed (Iran). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, n. 11, 1 jun. 2020.

NATHI AJAY CHANDRA; SANAT NALINI SAHOO. Assessing the impacts of climate and land cover change on groundwater recharge in a semi-arid region of Southern India. **Theoretical and Applied Climatology**, 13 jun. 2024.

OUMA, Y. O. et al. Dam Water Level Prediction Using Vector AutoRegression, Random Forest Regression and MLP-ANN Models Based on Land-Use and Climate Factors. **Sustainability**, v. 14, n. 22, p. 14934, 11 nov. 2022.

ÖZCAN, Z. et al. A pollution fate and transport model application in a semi-arid region: Is some number better than no number? **Science of The Total Environment**, v. 595, p. 425–440, out. 2017.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109–2135, 12 set. 2015.

Pasupuleti LN, Timbadiya PV, Patel PL (2023) Space–time dynamics of local scour around submerged tandem and staggered piers in sand beds. *Curr Sci* (00113891) 125 (11).

PAULO, J. et al. Predictor Importance for Hydrological Fluxes of Global Hydrological and Land Surface Models. **Water Resources Research**, v. 60, n. 9, 1 set. 2024.

RAÚL GIMÉNEZ et al. Hydrological and productive impacts of recent land-use and land-cover changes in the semiarid Chaco: Understanding novel water excess in water scarce farmlands. **Ecohydrology**, v. 13, n. 8, 21 ago. 2020.

REGASA, M. S.; NONES, M. Modeling the impact of historical and future land use land cover changes on the hydrological response of an Ethiopian watershed. **Sustainable Water Resources Management**, v. 10, n. 1, 10 jan. 2024.

REGASA, M. S.; NONES, M. Past and Future Land Use/Land Cover Changes in the Ethiopian Fincha Sub-Basin. **Land**, v. 11, n. 8, p. 1239, 4 ago. 2022.

RIVAS-TABARES, D. et al. Enhancing LULC scenarios impact assessment in hydrological dynamics using participatory mapping protocols in semiarid regions. **Science of The Total Environment**, v. 803, p. 149906–149906, 1 jan. 2022.

RUBENS JUNQUEIRA et al. Hydrological modeling using remote sensing precipitation data in a Brazilian savanna basin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 115, p. 103773–103773, 15 mar. 2022.

RUFINO, I. A. A. et al. Multi-Temporal Built-Up Grids of Brazilian Cities: How Trends and Dynamic Modelling Could Help on Resilience Challenges?. **Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 748, 2021.

- SANTHI, C. et al. VALIDATION OF THE SWAT MODEL ON A LARGE RWER BASIN WITH POINT AND NONPOINT SOURCES. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 37, n. 5, p. 1169–1188, out. 2001.
- SANTOS, et al. Brazilian Soil Classification System. **Embrapa.br**, 19 dez. 2019.
- SANTOS, C. et al. Using a Hierarchical Approach to Calibrate SWAT and Predict the Semi-Arid Hydrologic Regime of Northeastern Brazil. **Water**, v. 10, n. 9, p. 1137, 25 ago. 2018.
- SANTOS, J. Y. G. DOS et al. 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, ago. 2021.
- SCHOLLES, R. J. The Future of Semi-Arid Regions: A Weak Fabric Unravels. **Climate**, v. 8, n. 3, p. 43, 13 mar. 2020.
- SHARMA, A.; KHARE, R.; CHOUDHARY, M. K. Assessment of spatio-temporal variation of water balance components by simulating the hydrological processes of a large complex watershed. **Environmental Earth Sciences**, v. 82, n. 5, 1 mar. 2023.
- SHARMA, A.; PATEL, P. L.; SHARMA, P. J. Influence of climate and land-use changes on the sensitivity of SWAT model parameters and water availability in a semi-arid river basin. **CATENA**, v. 215, p. 106298, ago. 2022.
- SHAW, S. K.; SHARMA, A. Assessing groundwater potential zones in Sundargarh district: a comparative study using AHP and FR models. **Sustainable Water Resources Management**, v. 10, n. 3, 30 maio 2024.
- SINGH, P. K.; CHUDASAMA, H. Pathways for climate change adaptations in arid and semi-arid regions. **Journal of Cleaner Production**, p. 124744, out. 2020.
- SILVA et al. Geospatial assessment of eco-environmental changes in desertification area of the Brazilian semi-arid region. **Earth Sciences Research Journal**, v. 22, n. 3, p. 175–186, 1 jul. 2018.
- SILVA et al. Spatial distribution and estimation of rainfall trends and erosivity in the Epitácio Pessoa reservoir catchment, Paraíba, Brazil. **Natural Hazards**, v. 102, n. 3, p. 829–849, 1 jul. 2020.
- SILVA, C. K. M. et al. Caracterização territorial da bacia de contribuição do Sistema Hídrico Poções Epitácio Pessoa. In: **XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Aracaju, 2023.
- SILVA, E.A. et al. Determinação de limiares para a precipitação mensal das regiões homogêneas da Paraíba usando quantis. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, MS, v. 30, jan./jun., p. 93-111, 2022.
- SILVA, R. M. et al. Hydrological modeling in semiarid catchments under climate variability. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 30, 100703, 2020.

SILVA, L.; COTA, S. D. DOS S. Derivação de parâmetros para o uso do modelo SWAT na estimativa de recarga subterrânea em um aquífero cárstico- fissural do semiárido brasileiro. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 1, p. 22–33, 26 jan. 2019.

SILVA, M. V. DA et al. Pilot monitoring of caatinga spatial-temporal dynamics through the action of agriculture and livestock in the brazilian semiarid. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 19, p. 100353, ago. 2020.

SILVA, R. F. C. (org.). Paraíba 2000-2013. São Paulo: **Editora Fundação Perseu Abramo**, 2014.

SILVA, J. F. C. B. DA C. et al. Analysis of the response of the Epitácio Pessoa reservoir (Brazilian semiarid region) to potential future drought, water transfer and LULC scenarios. **Natural Hazards**, v. 108, n. 1, p. 1347–1371, 17 abr. 2021.

SLIEMAN, A.; KOZLOV, D. Evaluating performance of MIKE 11 NAM model for runoff modeling on upper basin of Orontes River in Syria. **E3S Web of Conferences**, v. 365, p. 03004, 2023.

SOUZA, B. I. DE; SUERTEGARAY, D. M. A.; LIMA, E. R. V. DE. DESERTIFICAÇÃO E SEUS EFEITOS NA VEGETAÇÃO E SOLOS DO CARIRI PARAIBANO. **Mercator**, v. 8, n. 16, p. 217–232, 30 set. 2009.

SOUZA DA SILVA, L. et al. Assessment of changes in land use and occupation on the hydrological regime of a basin in the west of Bahia. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 123, p. 104218, mar. 2023.

SOWAH, R. A. et al. Evaluation of the soil and water assessment tool (SWAT) for simulating E. coli concentrations at the watershed-scale. **Science of The Total Environment**, v. 746, p. 140669, dez. 2020.

TANKSALI, A.; SORAGANVI, V. S. Assessment of impacts of land use/land cover changes upstream of a dam in a semi-arid watershed using QSWAT. **Modeling Earth Systems and Environment**, 3 out. 2020.

THIEMIG, V. et al. Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo Basin. **Journal of Hydrology**, v. 499, p. 324–338, ago. 2013.

TOLA, S. Y.; SHETTY, A. Quantification of change in land cover and rainfall variability impact on flood hydrology using a hydrological model in the Ethiopian river basin. **Environmental Earth Sciences**, v. 82, n. 10, 1 maio 2023.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2012.

VIGIAK, O. et al. Sensitivity of SWAT to land use changes at different scales. **Environmental Modelling & Software**, v. 67, p. 1–14, 2015.

WAF AE EL HARRAKI et al. Streamflow Prediction Upstream of a Dam Using SWAT and Assessment of the Impact of Land Use Spatial Resolution on Model Performance. v. 8, n. 3, p. 1165–1186, 1 set. 2021.

W. Jiao, et al. Observed increasing water constraint on vegetation growth over the last three decades Nat. Commun., 12 (1) (2021), p. 3777.

- WEN, X.; THÉAU, J. Spatiotemporal analysis of water-related ecosystem services under ecological restoration scenarios: A case study in northern Shaanxi, China. **Science of The Total Environment**, p. 137477, fev. 2020.
- WU, L. et al. Multi-objective synchronous calibration and Pareto optimality of runoff and sediment parameters in an arid and semi-arid watershed. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 24, p. 65470–65481, 21 abr. 2023.
- WU, M. et al. Improving a hydrological model by coupling it with an LSTM water use forecasting model. **Journal of hydrology**, p. 131215–131215, 1 abr. 2024.
- XAVIER, P. C. D. S. Análise hidrossedimentológica da Bacia do Alto Rio Paraíba: Uma contribuição à morfodinâmica fluvial em ambientes semiáridos. Tese de Doutorado (Doutora em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2021.
- XU, C. et al. Assessing the impacts of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in Jinghe River basin, China. **Ecological Indicators**, v. 137, p. 108757, abr. 2022.
- YI, H. et al. Detecting the impact of the “Grain for Green” program on land use/land cover and hydrological regimes in a watershed of the Chinese Loess Plateau over the next 30 years. **Ecological Indicators**, v. 150, p. 110181–110181, 1 jun. 2023.
- YUAN, S. et al. Optimizing climate model selection for hydrological modeling: A case study in the Maumee River basin using the SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 588, p. 125064–125064, 1 set. 2020.
- Y. Zhang, et al. Enhanced dominance of soil moisture stress on vegetation growth in Eurasian drylands Natl. Sci. Rev., 10 (8) (2023).
- ZAMBRANO-BIGIARINI, M. hzambrian/hydroGOF: v0.6-0. **Zenodo** (CERN European Organization for Nuclear Research), 8 maio 2024.
- ZETTAM, A. et al. Applications of a SWAT model to evaluate the contribution of the Tafna catchment (north-west Africa) to the nitrate load entering the Mediterranean Sea. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 8, 12 jul. 2020.
- ZHANG, H. et al. Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: A case study of a catchment in tropical Australia. **Journal of Hydrology**, v. 585, p. 124822, 1 jun. 2020.
- ZHANG, L. et al. Model Uncertainty Analysis Methods for Semi-Arid Watersheds with Different Characteristics: A Comparative SWAT Case Study. **Water**, v. 11, n. 6, p. 1177–1177, 5 jun. 2019.
- ZHANG, Y. et al. Fine-Resolution Precipitation Mapping in a Mountainous Watershed: Geostatistical Downscaling of TRMM Products Based on Environmental Variables. **Remote Sensing**, v. 10, n. 1, p. 119, 17 jan. 2018.

ANEXO I

Tabela 19 - Continuação da lista de artigos com o ranking InOrdinatio e aspectos teóricos

Autores e ano de publicação	Título	<i>InOrdinatio</i>	Área de estudo / Extensão	Metodologia / modelo utilizado	Principais conclusões
(Author Maviza; Ahmed, 2020)	Analysis of past and future multi-temporal land use and land cover changes in the semi-arid Upper-Mzingwane sub-catchment in the Matabeleland south province of Zimbabwe	42,98	Sub-bacia hidrográfica do Alto Mzingwane / 2138 km ²	Classificação de imagens no software R e o TerrSet Land Change Modeller (LCM)	O estudo concluiu que a sub-bacia do Alto Mzingwane apresenta tendência de perda contínua da cobertura florestal densa até 2038, enquanto áreas de pastagens e arbustos vêm aumentando desde 1989. Essas mudanças no uso e cobertura da terra (LULC) podem gerar impactos negativos significativos nos aspectos sociais, econômicos, ecológicos e na segurança hídrica da região.
(Govender; Dube; Shoko, 2022)	Remote sensing of land use-land cover change and climate variability on hydrological processes in Sub-Saharan Africa: key scientific strides and challenges	41,79	África Subsaariana	SWAT, SCS-CN, Water and Energy Transfer between Soil, Plants, and Atmosphere (WetSpa) e Joint UK Land Environment Simulator (JULES)	Mudanças no uso da terra e variabilidade climática afetam os processos hidrológicos na África Subsaariana. O sensoriamento remoto, como o SEBS, tem sido útil na estimativa de evaporação total, mas enfrenta limitações. Mais pesquisas são necessárias para melhorar o gerenciamento dos recursos hídricos na região.

Autores e ano de publicação	Título	<i>InOrdinatio</i>	Área de estudo / Extensão	Metodologia / modelo utilizado	Principais conclusões
(ABD El-Hamid et al., 2020)	Effects of land use/land cover and climatic change on the ecosystem of North Ningxia, China	40,33	Área ao redor do Rio Amarelo, Ningxia do Norte	Uso de sensoriamento remoto e modelos estatísticos	O estudo avaliou a vulnerabilidade do ecossistema em North Ningxia entre 1995 e 2019, identificando que mudanças no uso e cobertura da terra (LULC) e o clima, especialmente este último, são os principais fatores que influenciam a estabilidade ecológica da região.
(Msigwa et al., 2021)	Comparison of blue and green water fluxes for different land use classes in a semi-arid cultivated catchment using remote sensing	30,65	Bacia hidrográfica de Kikuletwa, bacia do alto rio Pangani, Tanzânia.	Uso de sensoriamento remoto e modelos globais de balanço de energia de superfície	O estudo avaliou quatro métodos para estimar fluxos de água azul e verde na bacia de Kikuletwa (Tanzânia) e concluiu que o método EK foi o mais preciso ao distinguir entre áreas irrigadas, de sequeiro e naturais. Os métodos variaram bastante nos resultados, com EK se alinhando melhor aos padrões reais de uso da terra.
(Tanksali; Soraganvi, 2020)	Assessment of impacts of land use/land cover changes upstream of a dam in a semi-arid watershed using qswat	29,00	Bacia de Krishna / 258.948 km ²	SWAT	O estudo mostrou que as mudanças no uso da terra e a existência da barragem afetam as respostas hidrológicas da bacia.

Autores e ano de publicação	Título	<i>InOrdinatio</i>	Área de estudo / Extensão	Metodologia / modelo utilizado	Principais conclusões
(Rivas-Tabares et al., 2022)	Enhancing LULC scenarios impact assessment in hydrological dynamics using participatory mapping protocols in semiarid regions	28,55	Sub-bacia Arroyo de la Balisa / 242 km ²	SWAT e protocolo de mapeamentos participativos	O mapeamento participativo ajudou no desenvolvimento de cenários no SWAT, com o cenário de partilha de terras sendo o mais eficaz para proteger recursos hídricos. O pousio deve ser incluído em rotações de culturas para melhorar o balanço hídrico e a qualidade da água.
(Ouma et al., 2022)	Dam Water Level Prediction Using Vector Autoregression, Random Forest Regression and MLP-ANN Models Based on Land-Use and Climate Factors	28,15	Bacia do Rio Limpopo / 416.300 km ²	Autorregressão vetorial, Regressão random forest e modelo MLP-ANN	O estudo previu os níveis de água das barragens de Bokaa e Gaborone usando modelos como VAR e MLP-ANN. O MLP-ANN teve o melhor desempenho nas previsões climáticas, enquanto o modelo híbrido VAR-ANN melhorou a precisão.
(Dolgorsuren et al., 2024)	Hydrological responses to climate change and land-use dynamics in central asia's semi-arid regions: an swat model analysis of the tuul river basin	27,00	Bacia do Rio Tuul / 49.840 km ²	SWAT	Os cenários de mudanças no uso da terra e clima afetam os componentes hidrológicos na bacia do rio Tuul, com aumento da evapotranspiração e redução de escoamento e fluxo subterrâneo na área de estudo.

Autores e ano de publicação	Título	<i>InOrdinatio</i>	Área de estudo / Extensão	Metodologia / modelo utilizado	Principais conclusões
(Biro Turk; Aljughaiman, 2020)	Land use/land cover assessment as related to soil and irrigation water salinity over an oasis in arid environment	26,99	Al-Ahsa Oasis / 22.000 hectares	Uso de sensoriamento remoto e modelos estatísticos	O estudo analisou as mudanças no uso da terra (LULC) no Oásis de Al-Ahsa entre 1986 e 2016, identificando a redução contínua das áreas de tamareiras e o aumento de terras agrícolas. A salinidade do solo e da água de irrigação surgiu como um problema crescente, especialmente em áreas de tamareiras.
(Raúl Giménez et al., 2020)	Hydrological and productive impacts of recent land-use and land-cover changes in the semiarid Chaco: Understanding novel water excess in water scarce farmlands	26,77	Zona agrícola de Bandera / 9.347 km ²	Modelo desenvolvido no Software R e GIS	De 2000 a 2015, Bandera teve mudanças no uso da terra, com expansão de cultivos e sistemas agrícolas mais conservadores. Esses sistemas ajudam na produção em anos secos, mas aumentam a recarga de águas subterrâneas em anos chuvosos.
(Lin; Chen, 2023)	Analyzing and Simulating the Influence of a Water Conveyance Project on Land Use Conditions in the Tarim River Region	25,43	Região Autônoma Uigur de Xinjiang / 1,66 milhões de km ²	Uso de sensoriamento remoto e machine learning	O estudo mostrou que políticas de condução ecológica da água, ao redirecionar recursos hídricos para áreas a jusante, podem melhorar o uso da água em regiões áridas.

Autores e ano de publicação	Título	<i>InOrdinatio</i>	Área de estudo / Extensão	Metodologia / modelo utilizado	Principais conclusões
(Kumar; Singh; Gaurav, 2022)	Assessing the synergic effect of land use and climate change on the upper Betwa River catchment in Central India under present, past, and future climate scenarios	25,19	Bacia do Alto Betwa River na Índia Central / 9.322 km ²	SWAT	O modelo SWAT indicou quedas na precipitação, escoamento e percolação na bacia do Alto Rio Betwa entre 2001 e 2018. Projeções futuras mostram reduções significativas em precipitação e escoamento, afetando a segurança hídrica e a agricultura. A gestão sustentável dos recursos hídricos é crucial para o futuro.
(Abbasi et al., 2021)	Potential influence of climate and land-use changes on green water security in a semi-arid catchment	24,25	Bacia de Kashafrud / 16.750 km ²	SWAT	O modelo SWAT avaliou os impactos das mudanças climáticas e de uso da terra na Bacia de Kashafrud, mostrando aumento de áreas urbanas e pastagens, com leve aumento na água disponível, mas queda na segurança hídrica.
(Yi et al., 2023)	Detecting the impact of the “Grain for Green” program on land use/land cover and hydrological regimes in a watershed of the Chinese Loess Plateau over the next 30 years	24,23	Bacia de Liujiahe / 7.325 km ²	SWAT	A restauração ecológica na bacia de Liujiahe pode aumentar a vegetação e reduzir terras agrícolas, impactando o escoamento e a água subterrânea, aumentando a evapotranspiração.

Autores e ano de publicação	Título	<i>InOrdinatio</i>	Área de estudo / Extensão	Metodologia / modelo utilizado	Principais conclusões
(Silva et al., 2021)	Analysis of the response of the epítacio pessoa reservoir (brazilian semiarid region) to potential future drought, water transfer and lulc scenarios	22,43	Bacia do Alto Paraíba / 13.828 km ²	SWAT	A pesquisa indicou que, com o crescimento populacional e a redução das chuvas, o reservatório da EPR pode atingir o volume morto em 2022 e secar em cenários mais críticos.
(Al-Kubaisi; Al-Kubaisi, 2022)	Applying SWAT Model to Estimate the Annual Runoff of Wadi Al-Mohammadi Basin, Western Iraq	22,00	Bacia de Wadi Al-Mohammadi / 2286.8 km ²	SWAT	O estudo concluiu que o modelo SWAT é eficaz para analisar o ciclo hidrológico e identificar fatores que influenciam a disponibilidade de água. Na bacia do Wadi Al-Mohammadi, observou-se que há diferença entre o volume anual médio de escoamento superficial e de descarga devido à baixa inclinação do terreno.
(Anouar Hachemaoui et al., 2022)	Assessment of the hydrological impact of land use/cover changes in a semi-arid basin using the SWAT model (case of the Oued Saïda basin in western Algeria)	21,00	Bacia de Oued Saïda / 549 km ²	SWAT	O estudo avaliou o impacto das mudanças no uso da terra no regime hidrológico de uma bacia no oeste da Argélia, destacando o aumento de áreas florestais e urbanas e a redução de áreas agrícolas entre 1987 e 2002.

Autores e ano de publicação	Título	<i>InOrdinatio</i>	Área de estudo / Extensão	Metodologia / modelo utilizado	Principais conclusões
(Nathi Ajay Chandra; Sanat Nalini Sahoo, 2024)	Assessing the impacts of climate and land cover change on groundwater recharge in a semi-arid region of Southern India	17,88	Bacia de Chitravathi / 6.485 km ²	SWAT	O estudo demonstrou que o modelo SWAT é eficaz para estimar a recarga de águas subterrâneas considerando mudanças no uso da terra (LULC) e no clima.
(Regasa; Nones, 2024)	Modeling the impact of historical and future land use land cover changes on the hydrological response of an Ethiopian watershed	17,00	Bacia hidrográfica de Fincha	SWAT	O estudo analisou os impactos das mudanças no uso da terra (LULC) nas condições hidrológicas futuras da bacia de Fincha, na Etiópia. Constatou-se que o aumento de áreas agrícolas e urbanas em detrimento das florestas elevou o escoamento superficial e reduziu o fluxo de águas subterrâneas e laterais.
(Freire et al., 2025)	Streamflow prediction based on the soil and water assessment tool in the Pajeú river basin, Brazilian semiarid	16,70	Bacia do rio Pajeú / 19.000 km ²	SWAT	O estudo avaliou o desempenho do modelo SWAT na simulação hidrológica da bacia do Rio Pajeú, destacando a importância da calibração de parâmetros sensíveis, especialmente o CN2, que impacta fortemente o escoamento superficial.

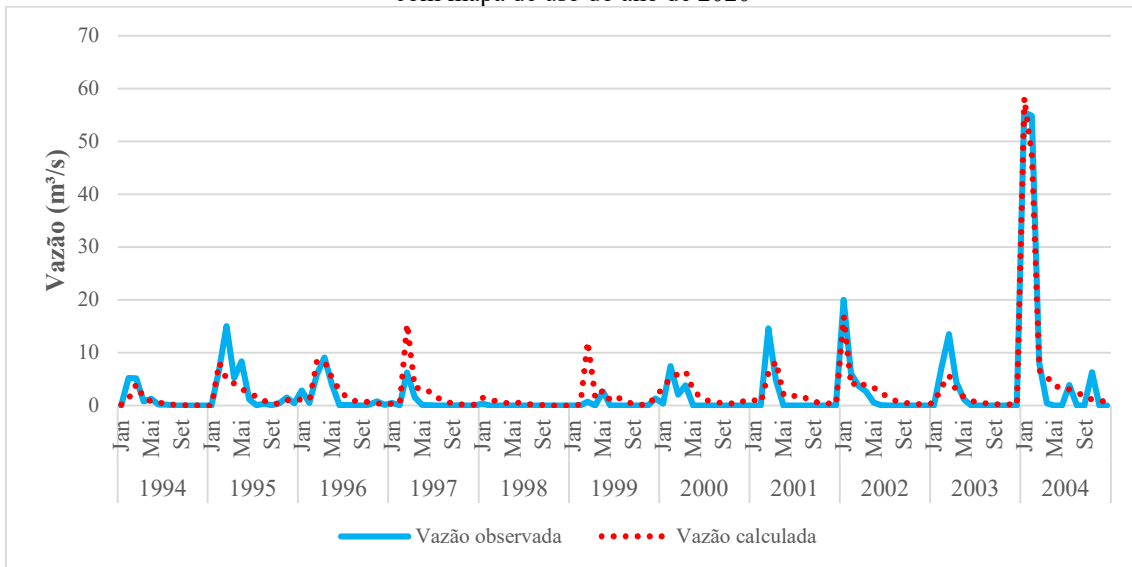
Autores e ano de publicação	Título	<i>InOrdinatio</i>	Área de estudo / Extensão	Metodologia / modelo utilizado	Principais conclusões
(Anandharuban; Panchanathan; Haghighi; Mourad Oussalah, 2023)	A multi-criteria approach for improving streamflow prediction in a rapidly urbanizing data scarce catchment	16,00	Bacia do rio Adyar / 828 km ²	SWAT	O estudo aplicou o modelo SWAT na bacia do rio Adyar, na Índia, com escassez de dados, visando melhorar a previsão de vazões e reduzir incertezas. A abordagem multicritério, que combinou mudanças dinâmicas no uso da terra (LULC) com calibração multiparâmetro (vazão, evapotranspiração e recarga subterrânea), resultou em melhor desempenho.
(Ayieko et al., 2023)	Spatial modeling of groundwater across land use land cover and climate change gradient using SWAT and Logan's method: a case study of Mbagathi sub-catchment	15,00	Sub-bacia de Mbagathi / 166 km ²	SWAT e método logan	O estudo evidenciou a superexploração das águas subterrâneas em bacias hidrográficas, especialmente em regiões áridas e urbanizadas, causada por mudanças no uso da terra (LULC), aumento de superfícies impermeáveis e incertezas climáticas. Entre 1990 e 2020, a recarga de aquíferos diminuiu cerca de 5%, enquanto o escoamento aumentou na área de estudo.

Autores e ano de publicação	Título	<i>InOrdinatio</i>	Área de estudo / Extensão	Metodologia / modelo utilizado	Principais conclusões
(Boddepalli manikanta; yaswanth, 2025)	Impact assessment of future LULC and climate change on hydrology in the Upper Pennar basin, India	15,00	Bacia do Alto Rio Pennar / 5574 km ²	SWAT	O estudo avaliou os impactos das mudanças climáticas e do uso da terra (LULC) no balanço hídrico da bacia do Alto Pennar até 2100, sob os cenários RCP 4.5 e 8.5. Projetou-se aumento na precipitação e no escoamento superficial (até 200%), com elevação no fluxo de água (até 22,5%) e variações na evapotranspiração.
(Asmar et al., 2021)	Effect of Land Use\Land Cover Changes on Estimated Potential Runoff in the Nablus Mountains Watersheds of Palestine: A Case Study	15,00	Bacia hidrográfica das Montanhas Nablus / 3365 km ²	Método do SCS Intersecção de Shapefiles de LULC e grupo de solo hidrológico (HGS) utilizando o ambiente GIS	O estudo nas Montanhas de Nablus revelou que a transformação de áreas naturais em urbanas e agrícolas aumentou o escoamento superficial, intensificando enchentes repentinas. Entre 1984 e 2016, as áreas urbanas cresceram 116%, a agricultura 8% e as terras nuas 22%, enquanto pastagens, gramíneas densas e florestas diminuíram em 14%, 7% e 22%, respectivamente

Autores e ano de publicação	Título	<i>InOrdinatio</i>	Área de estudo / Extensão	Metodologia / modelo utilizado	Principais conclusões
(Dan et al., 2022)	Quantitative impacts of climate change and human activities on runoff in the Huolin River catchment	14,25	Bacia hidrográfica do Rio Huolin / 36.623 km ²	SWAT	O estudo analisou os impactos das mudanças climáticas e das atividades humanas no escoamento superficial na Região Centro-Oeste da China. Constatou-se que, nos últimos 20 anos, a redução do escoamento foi causada principalmente pela ação humana.
(Ait m'barek et al., 2024)	The combined impact of climate change scenarios and land use changes on water resources in a semi-arid watershed	14,00	Bacia hidrográfica de El Grou / 3504 km ²	SWAT	O estudo mostrou que a bacia de El Grou é altamente sensível às mudanças climáticas e ao uso da terra, prevendo até 2050 redução de chuvas (5% a 34%), escoamento (41% a 73%) e áreas agrícolas e florestais, com aumento da evapotranspiração e das temperaturas.
(Mebrahte et al., 2024)	The impact of land use land cover change on hydropower potential in northern Ethiopia	14,00	Bacia hidrográfica do alto Geba / 2345 km ²	WetSpa	O estudo da bacia hidrográfica, revelou que, entre 2000 e 2018, o crescimento populacional impulsionou a expansão agrícola e urbana, substituindo arbustos e pastagens.

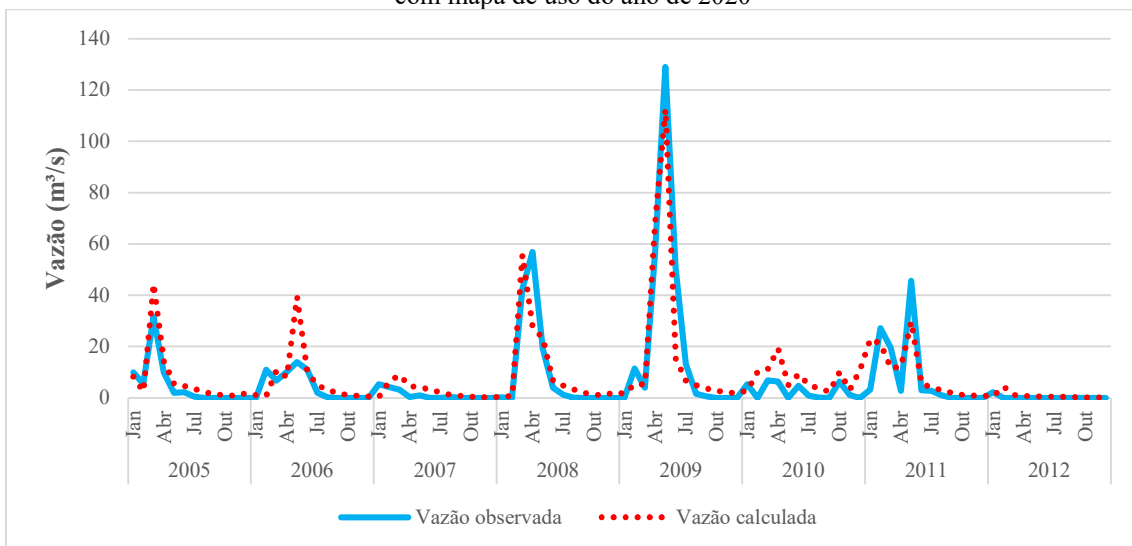
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 33 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2020



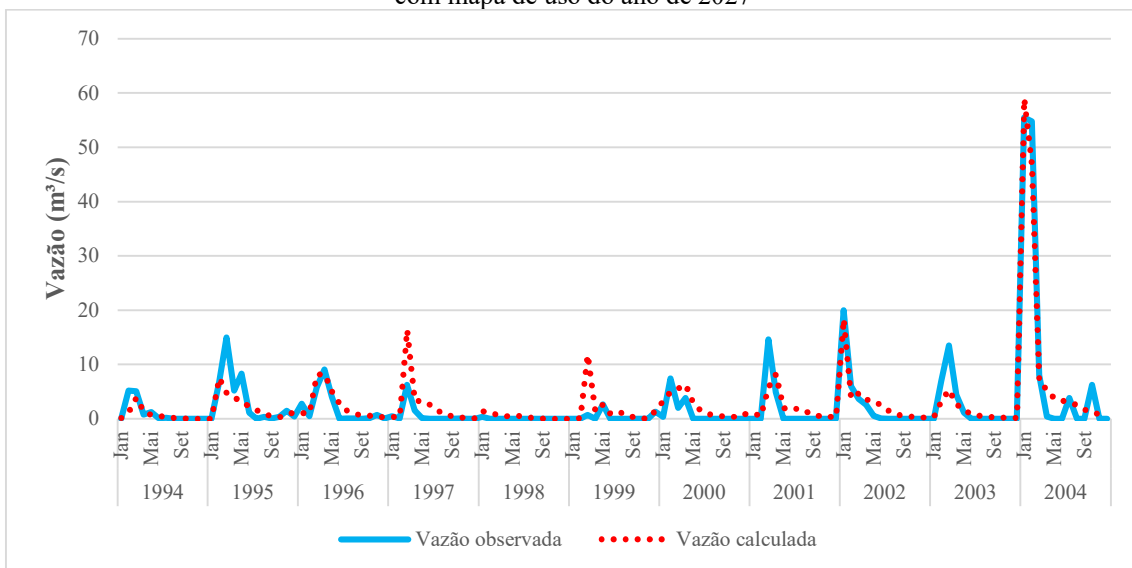
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 34 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2020



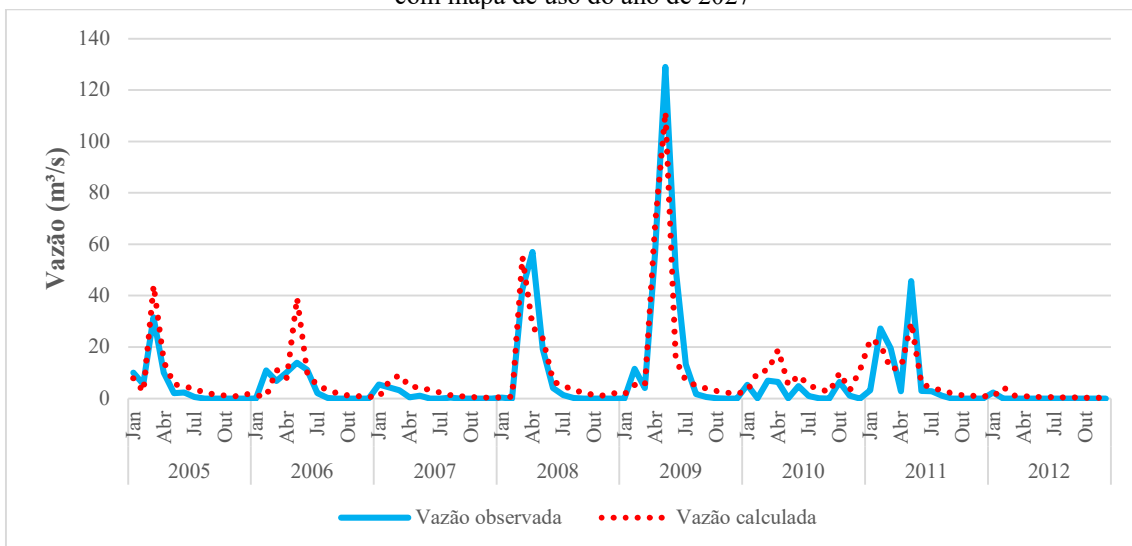
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 35 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2027



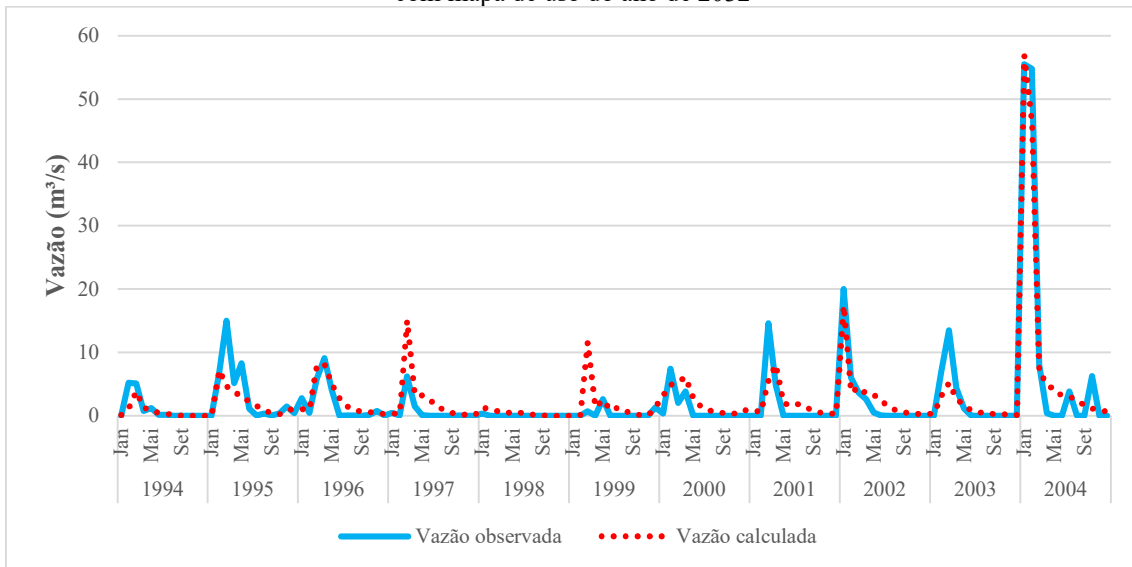
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 36 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2027



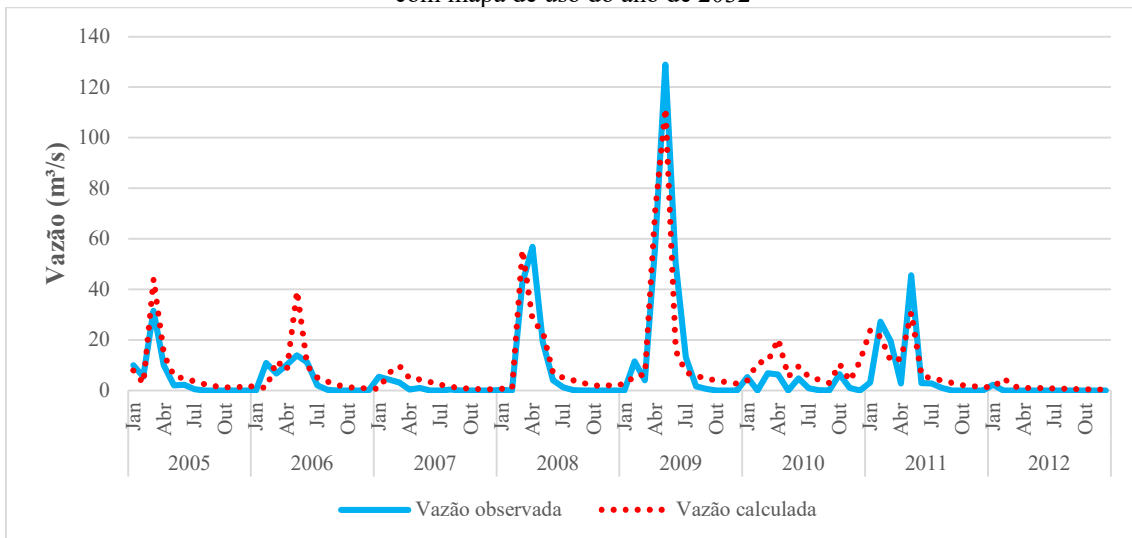
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 37 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2032



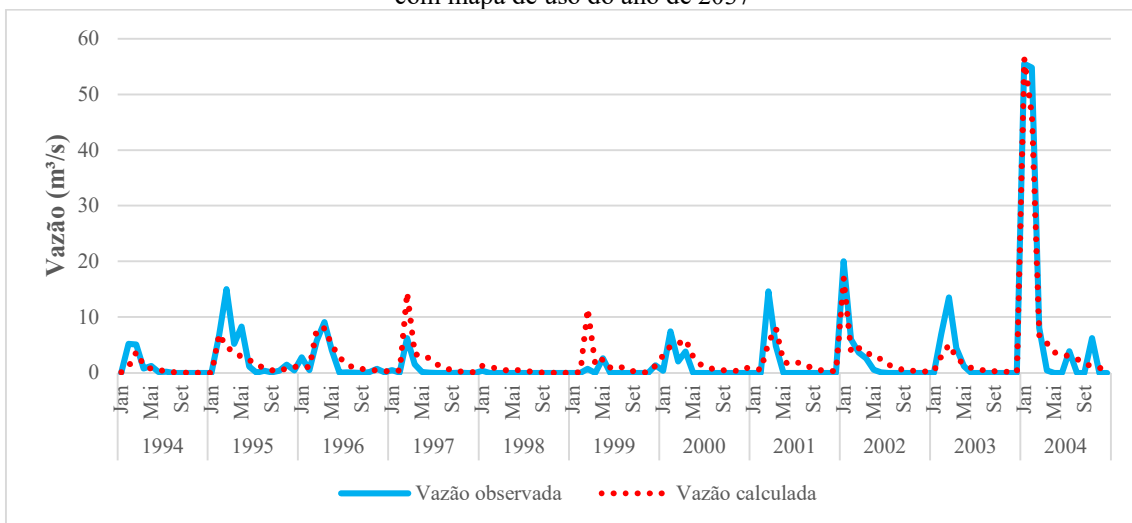
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 38 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2032



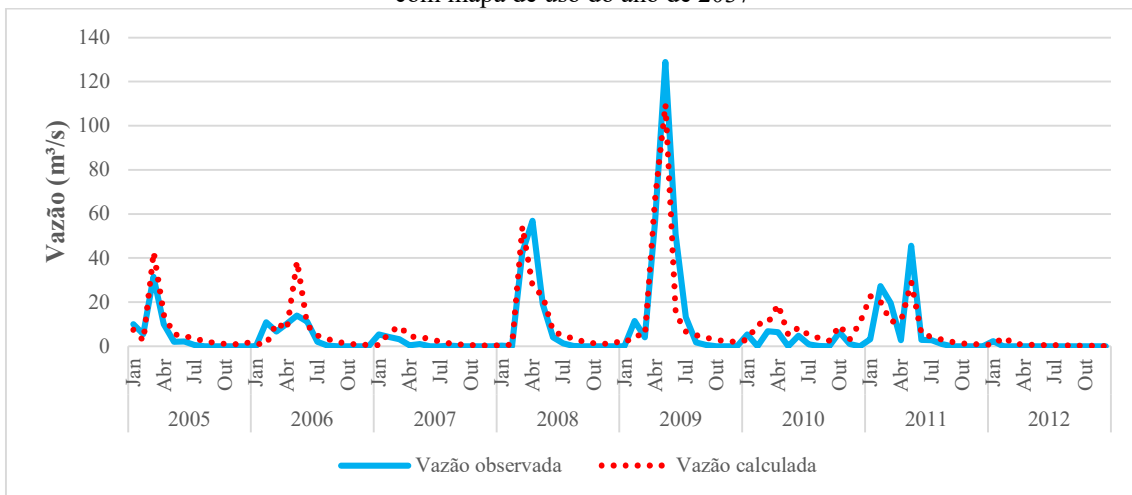
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 39 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2037



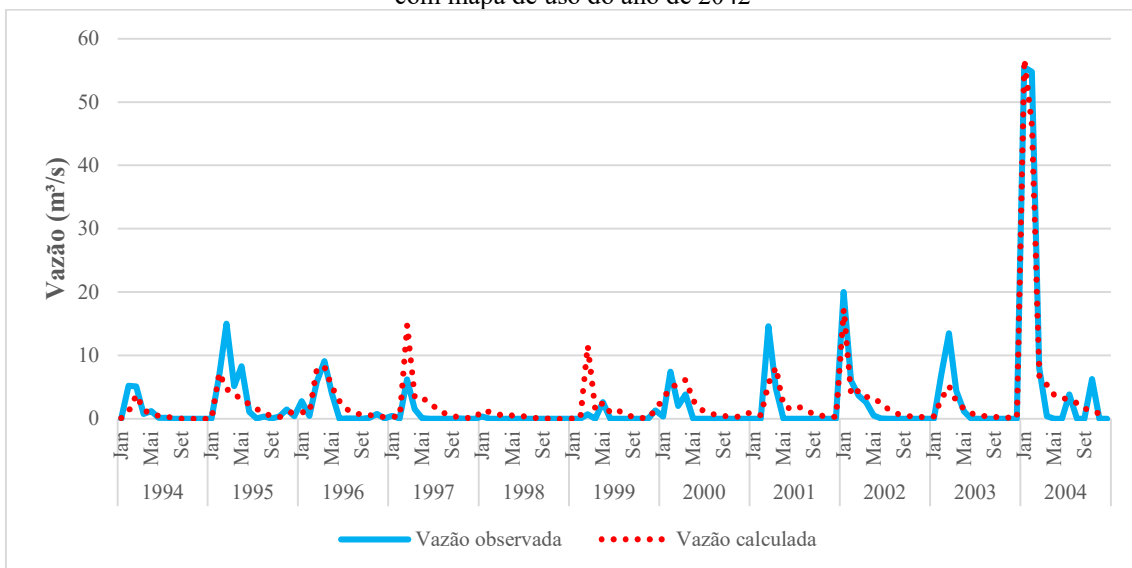
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 40 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2037



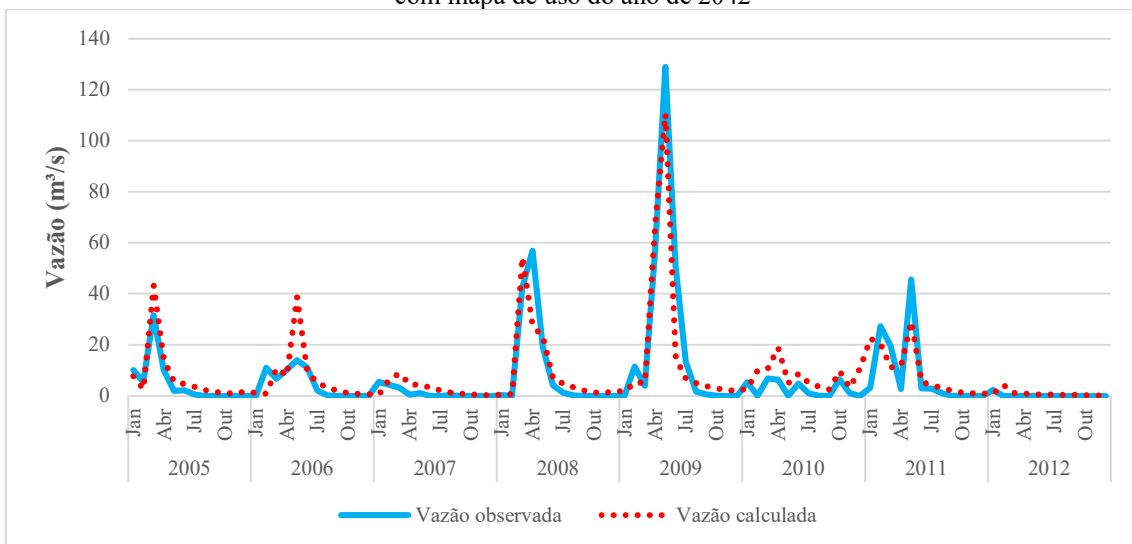
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 41 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2042



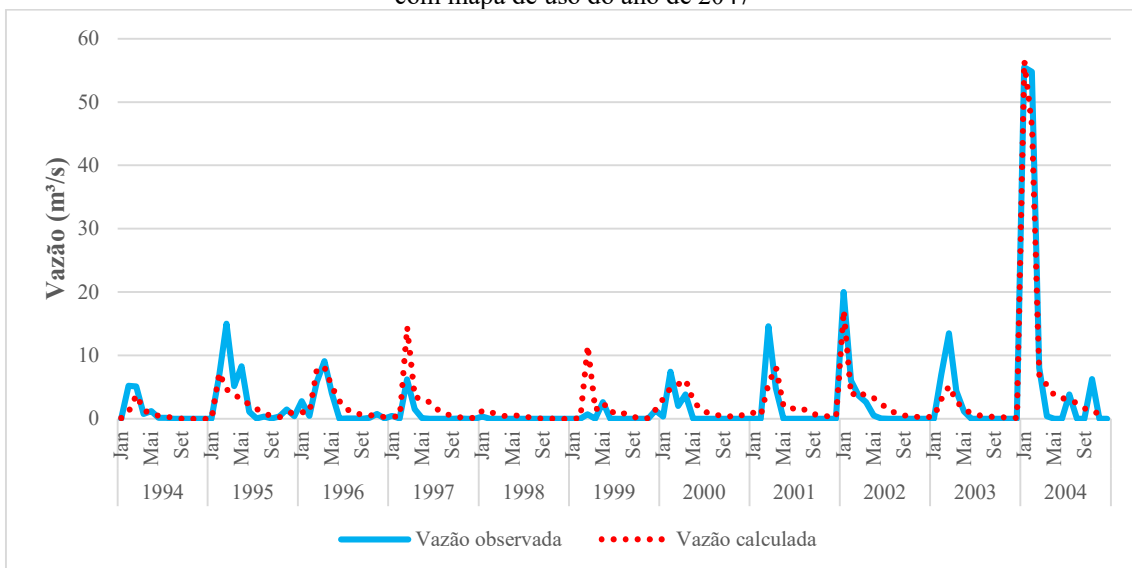
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 42 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2042



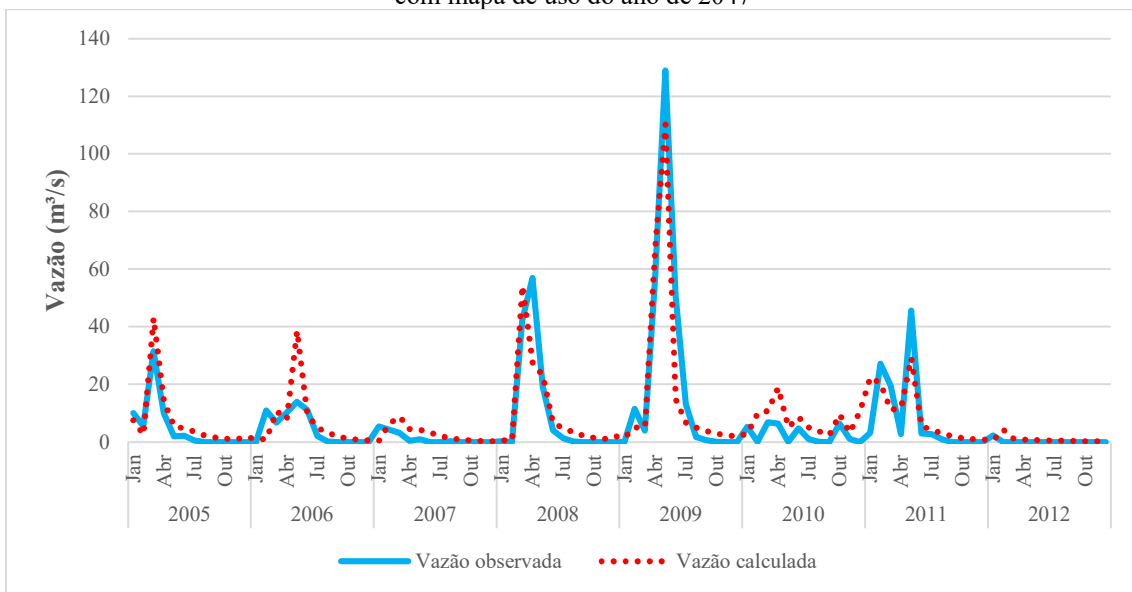
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 43 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2047



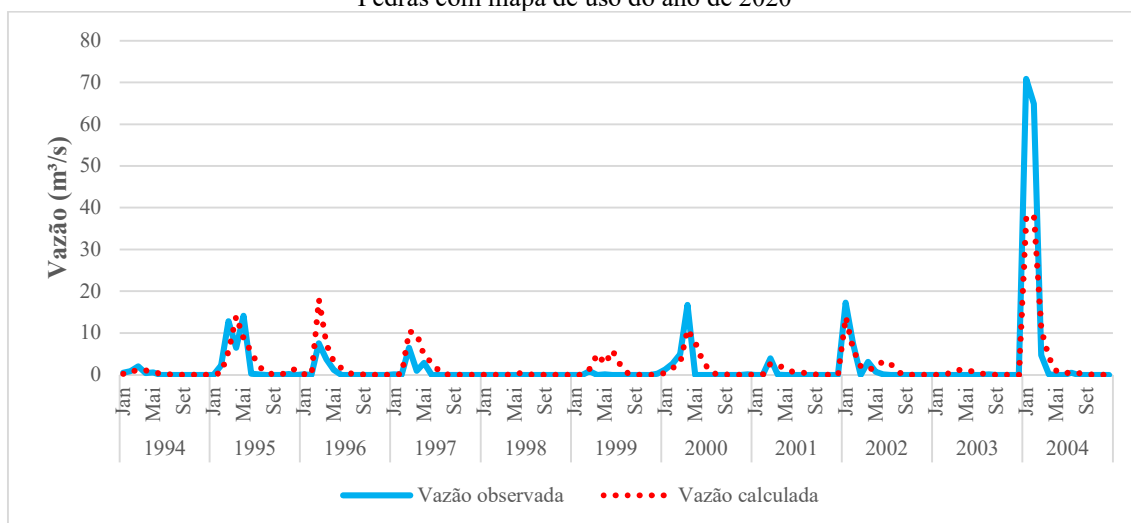
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 44 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Caraúbas com mapa de uso do ano de 2047



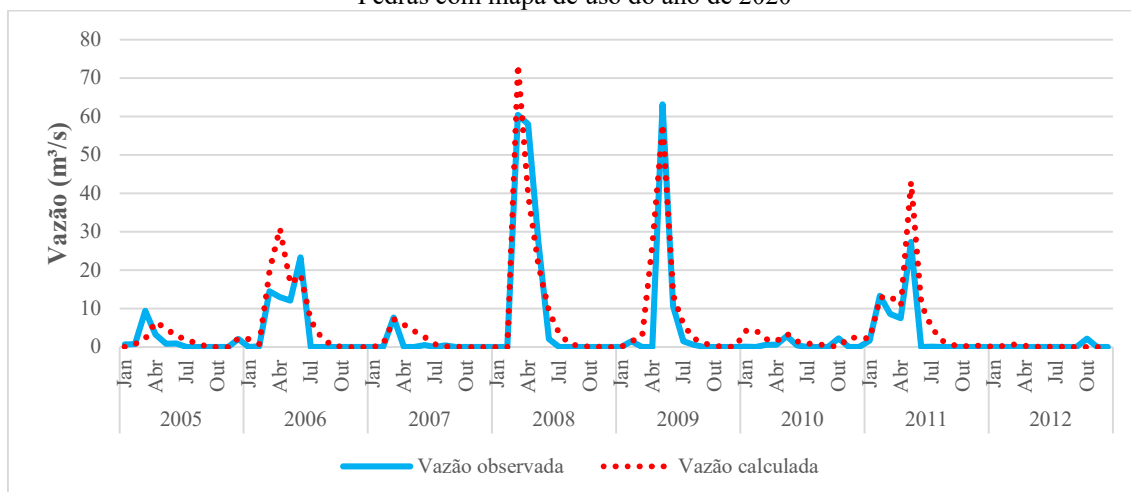
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 45 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2020



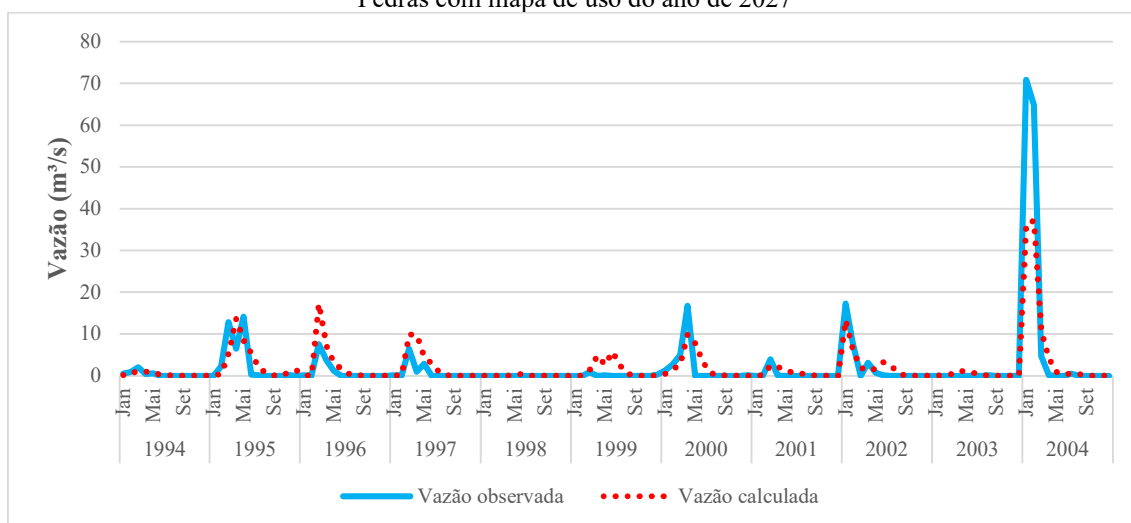
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 46 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2020



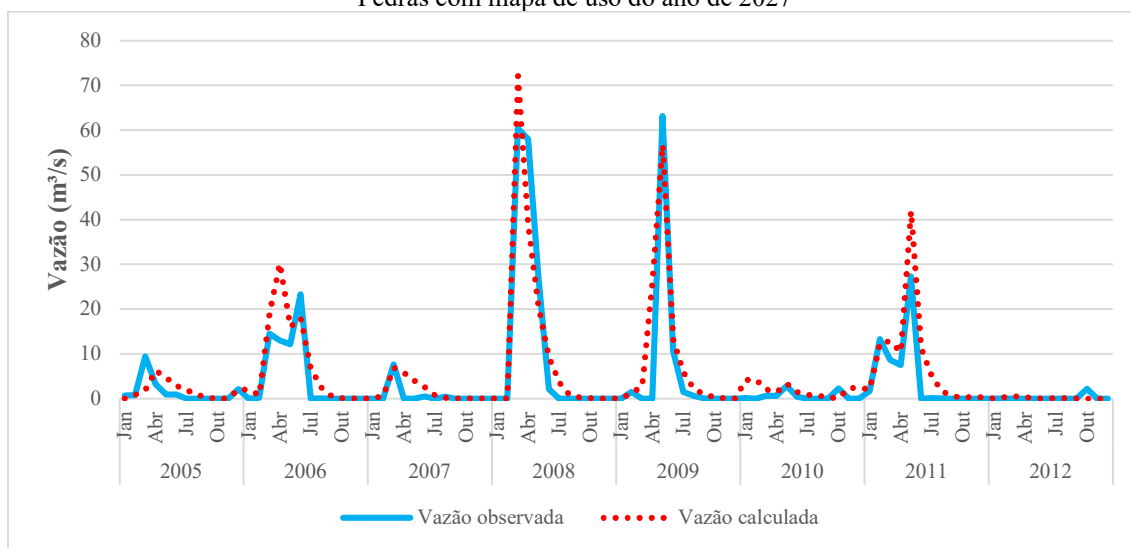
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 47 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2027



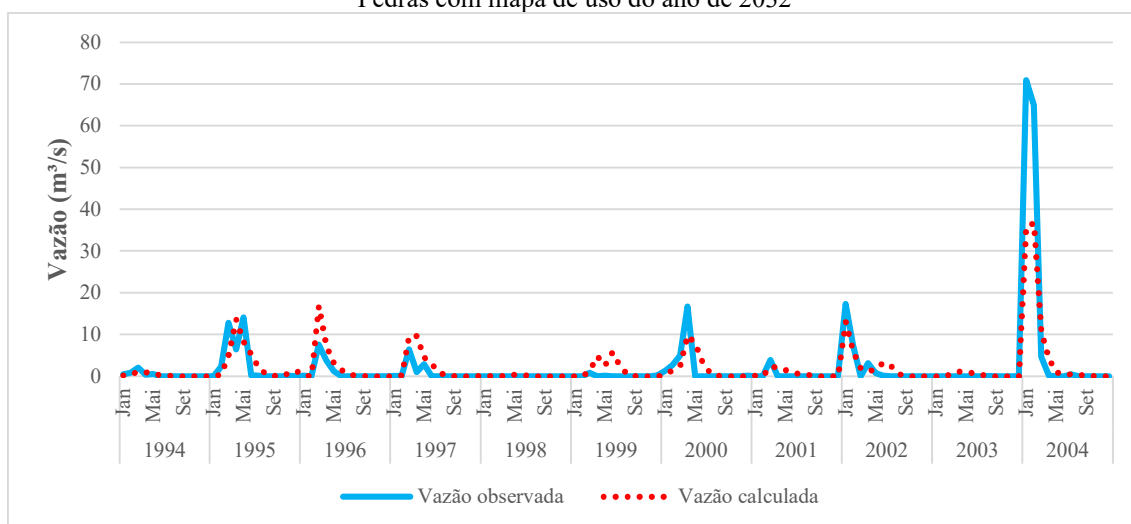
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 48 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2027



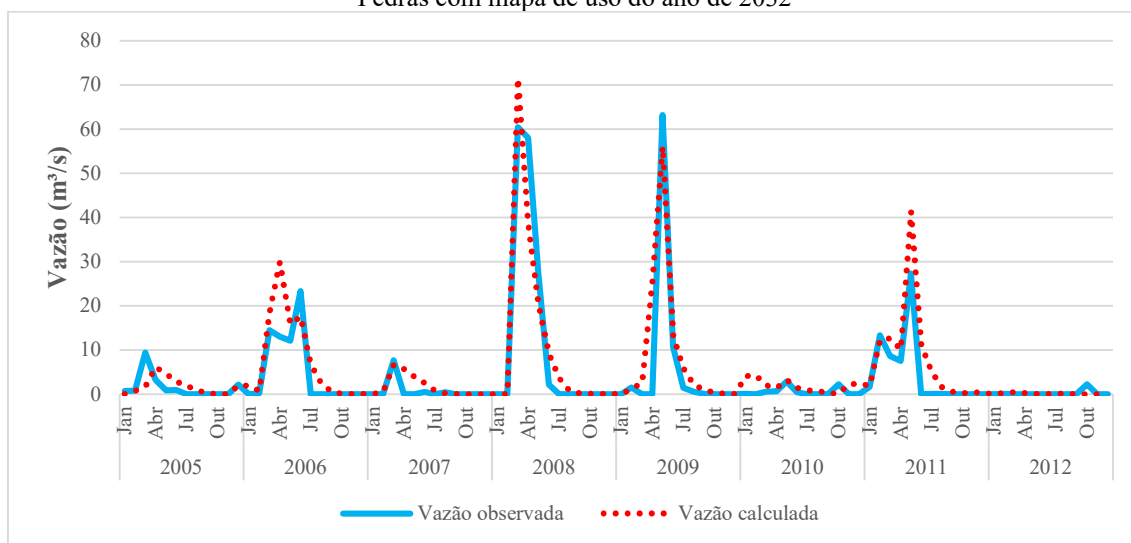
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 49 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2032



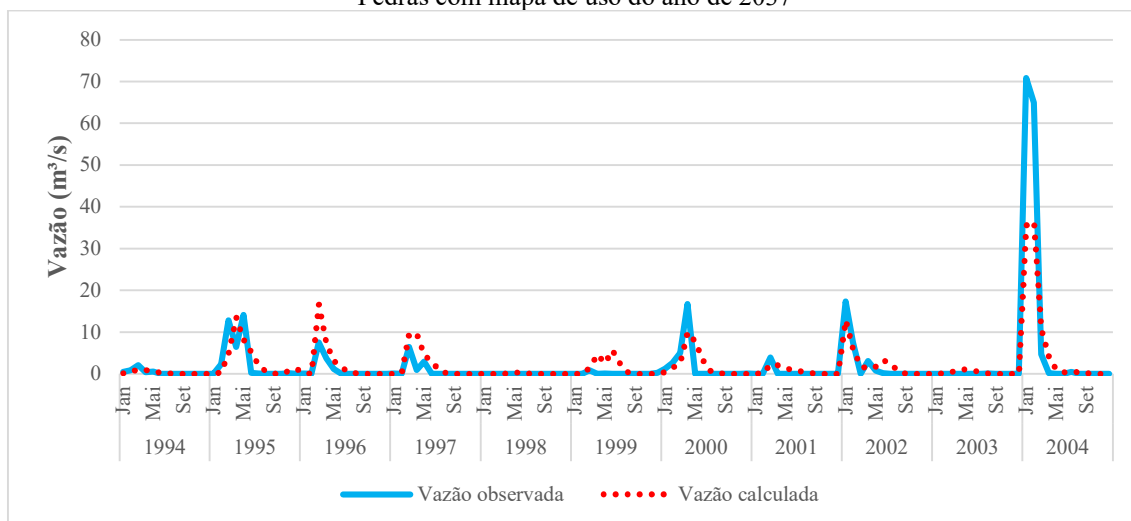
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 50 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2032



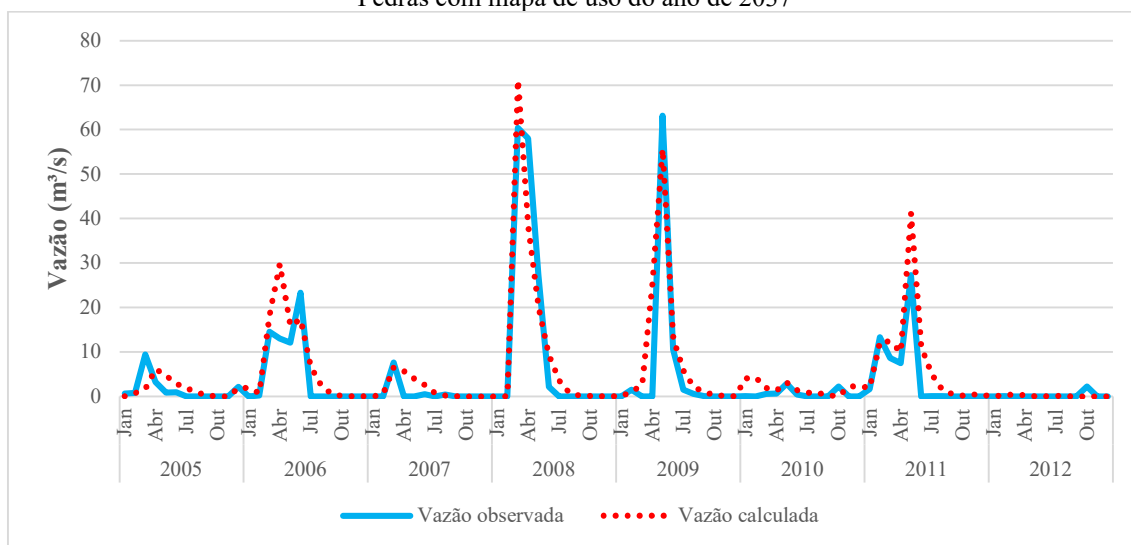
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 51 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2037



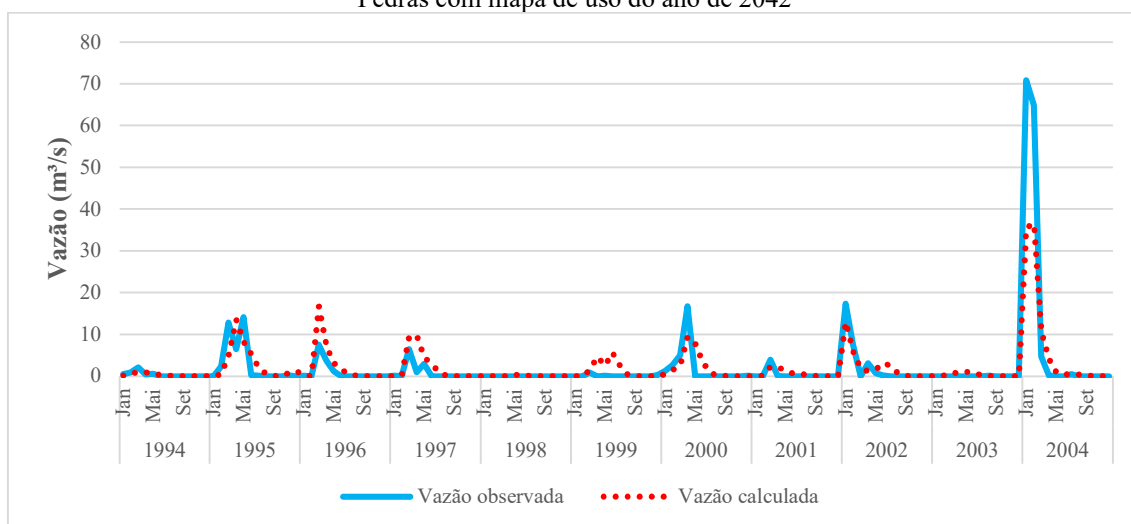
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 52 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2037



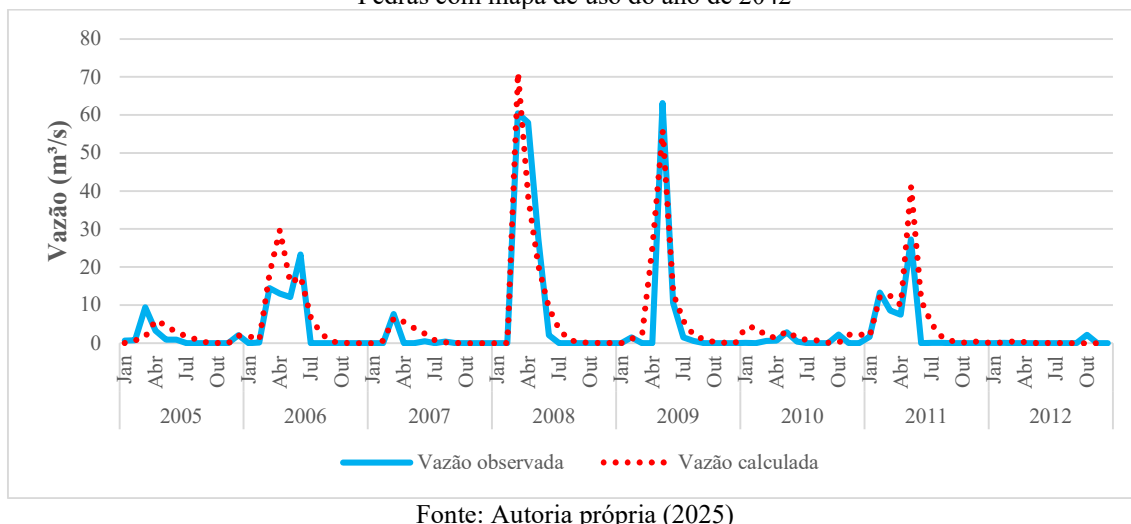
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 53 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2042



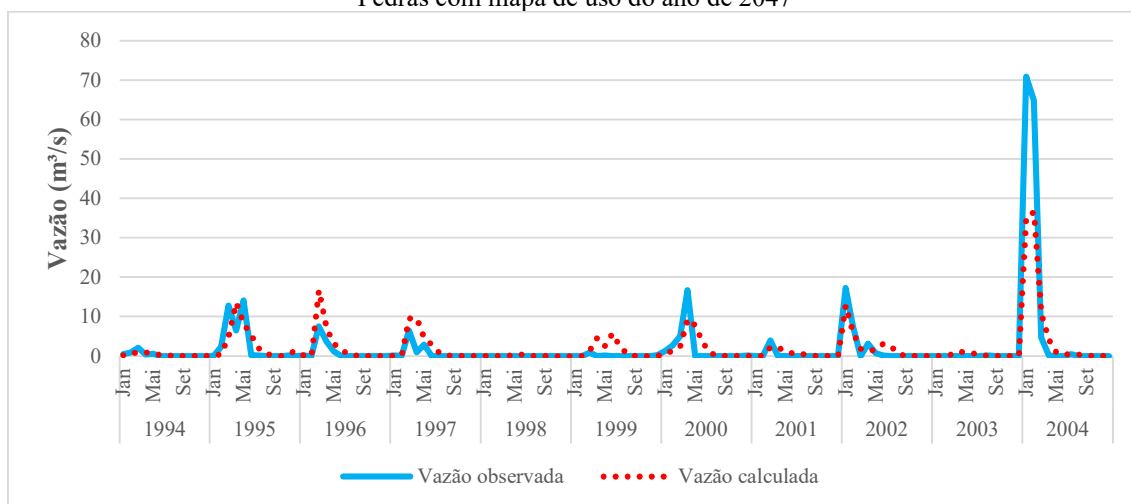
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 54 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2042



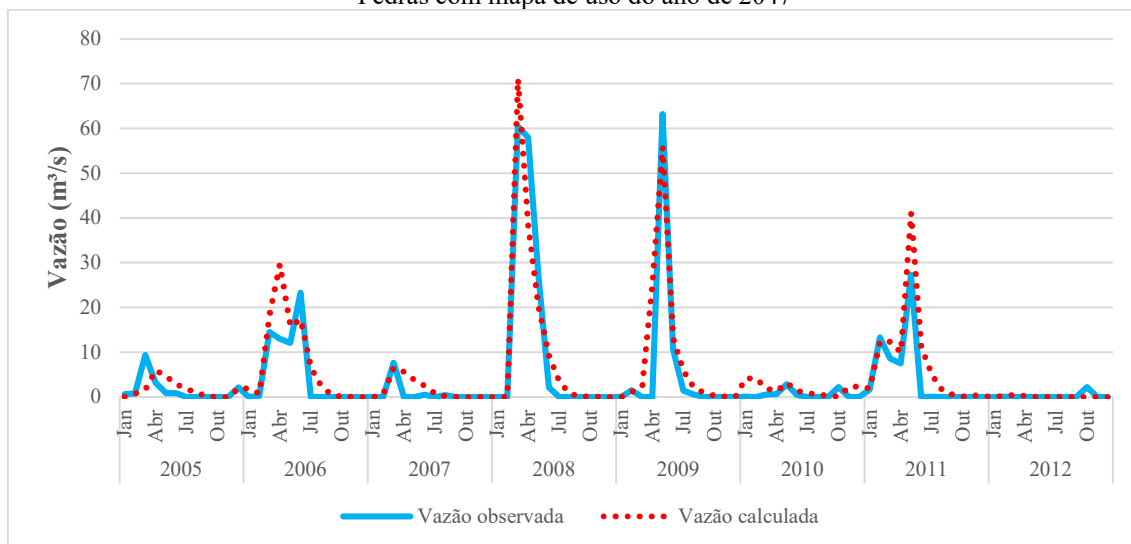
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 55 - Hidrogramas observados e simulados após a calibração dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2047



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 56 - Hidrogramas observados e simulados após a validação dos parâmetros para estação Poço de Pedras com mapa de uso do ano de 2047



Fonte: Autoria própria (2025)